

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 – Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace frézy s využitím 3D tisku

Autor: Bc. Jakub NÝVLT

Vedoucí práce: Doc. Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval docentu Zetkovi za jeho vstřícný přístup a cenné rady při vypracovávání práce. Dále mé poděkování náleží inženýru Bakšovi, inženýru Povolnému a bakaláři Tichému za jejich pomoc a rady při zpracovávání práce. Obzvlášť bych chtěl poděkovat mojí manželce Kristýně a dětem Barušce a Šimonkovi, za jejich trpělivost a podporu, bez kterých bych se během studia neobešel.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Nývlt	Jméno Jakub	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Zetek, PhD.	Jméno Miroslav	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace frézy s využitím 3D tisku		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	68	TEXTOVÁ ČÁST	68	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce se zabývá optimalizací frézy za pomoci 3D tisku. V první části jsou představeny druhy 3D tisku podle normy ISO/ ASTM 52900:2015, aditivně vyráběné frézy předních světových výrobců nástrojů a možnosti optimalizace nástrojů. V praktické části je vytvořen model frézy s optimalizovanými vnitřními rozvody provozní kapaliny a výstupními tryskami na VBD, který je vytisknut na 3D tiskárně a obroben. Následuje zaměření a experiment, při kterém se zjišťuje trvanlivost VBD při obrábění materiálu Inconel 718. Výsledky se porovnávají se stejnými experimenty frézy, které byly provedeny na ZČU v Plzni v nedávné době. V závěru je navržena optimalizace ke snížení výrobních nákladů.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Optimalizace frézy, 3D tisk nástroje, frézování Inconel 718, Optimalizace výrobních nákladů při výrobě frézy,</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Nývlt	Name Jakub	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, Additive Technology and Quality Assurance		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Zetek,.PhD.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST – KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Cutter optimization using 3D printing		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Department of machining technology	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	------------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	68	TEXT PART	68	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The diploma thesis focuses on optimization of the milling cutter using 3D printing. In the theoretical part, there are presented types of 3D printing according to ISO/ ASTM 52900:2015, additively manu-factured milling cutters of the world's leading tool manufacturers and the possibilities of milling tools optimization. In the practical part, the model of the cutter with optimized internal working fluid lines and outlet nozzles on VBD is designed, printed on a 3D printer, and machined. In the next step, the experiment takes place to investigate the durability of the VBD during machining of the material Inconel 718. The results are compared with the similar experiments of milling cutters that have been recently carried out at ZČU in Pilsen. An optimization to reduce the production costs is proposed in the conclusion part.</p>
KEY WORDS	<p>optimization of the milling cutter, 3D tool printing, milling of the material Inconel 718, optimalization of production costs in the production of millin cutters</p>

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	3
1. Úvod.....	5
2. Rozbor současného stavu	6
2.1. Norma ISO/ASTM 52900:2015	6
2.2. Druhy 3D tisku	7
2.2.1. Vytlačování materiálu (Material Extrusion)	7
2.2.2. Nanášení tryskáním (Material Jetting)	8
2.2.3. Tryskání pojiva (Binder Jetting)	9
2.2.4. Laminace plátů (Sheet Lamination)	10
2.2.5. Fotopolymerace (Vat Photo-polymerization).....	11
2.2.6. Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion)	12
2.2.7. Přímé energetické nanášení (Directed Energy Deposition)	13
2.3. Optimalizace	15
2.4. Strukturální optimalizace využívaná u 3D tisku nástrojů.....	18
2.4.1. Topologická optimalizace	20
2.4.2. Odlehčená struktura (lattice structure)	21
2.5. Optimalizace 3D tisku výrobců nástrojů (fréz)	23
2.5.1. Sandvik Coromant odlehčená fréza CoroMill® 390.....	23
2.5.2. Gühring plochá fréza PKD SMART CAP PF3000G	25
2.5.3. Komet Group Řada frézovacích nástrojů „Revolution“ PKD stopková fréza a šroubová fréza HPC	26
2.5.4. Gühring stopková fréza pro přesné obrábění kovů	27
2.6. Možné budoucí uplatnění 3D tisku.....	28
3. Návrh vlastního řešení a jeho realizace	29
3.1. Informace potřebné k návrhu.....	29
3.1.1. Teplo při obrábění	29
3.1.2. Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení břitu nástroje	31
3.1.3. Plastické deformace.....	31
3.1.4. Opotřebení rezných nástrojů způsobené zvýšenými teplotami	32
3.1.5. Důvody pro chlazení při obrábění	33
3.1.6. Požadavky na chladicí kapalinu	33
3.1.7. Způsob přívodu procesní kapaliny do místa řezu.....	34
3.1.8. Směřování přívodu procesní kapaliny	35

3.1.9. Tlak řezné kapaliny	36
3.2. Návrh vlastního řešení	38
3.3. Výroba	40
3.3.1. Vytvoření modelu pro výrobu	40
3.3.2. Zařízení pro tisk	41
3.3.3. Postprocessing	42
3.3.4. Obrábění funkčních ploch	43
3.3.5. Příprava obrábění	44
3.3.6. Průběh experimentu.....	47
4. Zhodnocení výsledků	52
4.1. Technické hodnocení	55
4.2. Možnost optimalizace s cílem snížení celkových výrobních nákladů.....	57
5. Závěr.....	61
6. Seznam použitých zdrojů	62
Seznam obrázků	66
Seznam tabulek	68
Seznam grafů.....	68

Přehled použitých zkratk a symbolů

RTI	regionální technologický institut
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolithography
3D	trojrozměrný
ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro standardizaci)
ASTM	American Society for Testing and Materials (americká společnost pro testování a materiály)
FFF	Fused Filament Fabrication
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
PLA	kyselina polylactonová
HIPS	houževnatý polystyren
TPU	termoplastický polyuretan
PA	alifatický polyamid
PEEK	PolyEther Ether Ketone
PEI	PolyEtherimide
UV	ultraviolet (ultrafialové záření)
2D	dvourozměrný
UAM	ultrazvuková aditivní výroba
LOM	Laminated Object Manufacturing
CBAM	Composite Based Additive Manufacturing
LCD	Liquid Crastal Display
SLA	Stereolitography
DLP	Digital Light Processing
SLS	selektivní laserové slinování
DMLS	přímé laserové slinování kovů
SLM	selektivní laserové tavení
EBM	tavení elektronovým paprskem
MJF	Multi Jet Fusion
CNC	počítačem řízené stroje
DED	Directed-energy Deposition
LTE	Long Term Evolution
NFC	Near Field Communication
GPS	Global Positioning System (globální polohový systém)

Wifi	Wireless Fidelity bezdrátová komunikaci v počítačových sítích
WLAN	Wireless Local Area Network (Bezdrátová lokální síť)
IoT	Internet of Things (internet věcí)
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
LDW	Laser Deposition Welding
ZČU	Západočeská univerzita
BCC	Body Centered Cubic
MP	matematické programování
OC	optimalitycriteria
FSD	metoda plně namáhaného návrhu
ESO	evoluční strukturální optimalizace
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization; (metoda pevné izotropní mikrostruktury s penalizací)
AM	Additive manufacturing (aditivní výroba)
CAD	počítačem podporované navrhování
FEA	analýzy konečných prvků
VBD	vyměnitelná břitová destička
PKD	polykrystalický diamant
MQL	Minimum Quantity Lubrication
μm	mikrometr
mm	milimetr
psi	pound per square inch (ibra síly na čtverečný palec)
HRSA	duplexní korozivzdorné oceli a žárovzdorné materiály
ap	hloubka řezu
Bc.	bakalář
Doc.	docent
Ing.	inženýr
PhD.	doktor
KTO	katedra technologie obrábění
FST	fakulta strojní

1. Úvod

Každá společnost, která se chce dlouhodobě udržet na trhu musí vytvářet zisk. To je zjednodušený důvod podnikání. Je běžnou praxí investovat část zisku zpět do podniku, což je nutné z hlediska udržitelnosti, aby se mohl podnik dále rozvíjet. Je to z toho důvodu, aby byla společnost konkurenceschopná, zvyšuje se tím produktivita, práce se stává méně fyzicky náročná, je pro zaměstnance bezpečnější, výrobky jsou kvalitnější a snižují se výrobní náklady. Nakupují se nové stroje, zavádí se do výroby nové technologie, vzdělávají se zaměstnanci a podobně. Mezi snižování výrobních nákladů můžeme zařadit i prodlužování trvanlivosti nástrojů, případně jejich částí. Toho je možné dosáhnout různými způsoby. Volbou materiálu, úpravou podmínek při obrábění, nebo lepším systémem chlazení při obrábění. Tomuto tématu se věnuje předkládaná diplomová práce Optimalizace frézovací hlavy pomocí 3D tisku.

Na začátku teoretické části práce byl proveden rozbor současného stavu výroby frézovacích nástrojů pomocí aditivní technologie. Následně bylo analyzováno teplotní zatížení řezné části, tvorba třísky při frézování, způsoby přívodu procesní kapaliny a její vliv na opotřebení řezných částí nástroje. Z uvedených poznatků byl proveden návrh vlastního řešení. Tímto řešením je přivedení procesní kapaliny na nejexponovanější místa při řezném procesu.

Následně byla frézovací hlava vyrobena. Pro ověření účinnosti navržených opatření byl naplánován experiment, při kterém byl obráběna deska ze slitiny INCONEL 718. Jedná se o velmi těžce obrobitelnou slitinu, kde základ tvoří 50-55 % niklu a 17-21 % chromu, která byla původně vyvinuta pro vesmírné účely. Úspěšně se používá v extrémních prostředí jako jsou turbíny, letecké motory a části jaderných reaktorů. Naměřené hodnoty získané z obrábění byly porovnány s daty z již provedených experimentů frézovacích hlav podobného typu, které byly navrženy na ZČU jako závěrečné práce, nebo v RTI při ZČU jako výzkumné projekty.

Při optimalizaci frézovací hlavy bylo vycházeno z modelu konvenčně vyráběné frézy od firmy OSG. Z tohoto typu frézy v minulosti vycházel i tým RTI s docentem Zetkem při výrobě frézovací hlavy Kraken. V tomto případě se jednalo o materiálovou optimalizaci, při které byla použita prutová konstrukce, aby byl zachován pouze nutný materiál k přenosu sil. V dnešní době by se dalo použít metodu konečných prvků a výsledek by byl podobný. Podobný projekt, frézovací hlava Medúza z dílny RTI pod vedením doktora Hanzla si kladl za požadavek optimalizaci pomocí odlehčené struktury (lattice structure), díky které dochází k velké úspoře materiálu a tím i k úspoře hmotnosti.

V závěru práce je uvedeno doporučení možné optimalizace výrobního procesu kombinací aditivní a konvenční technologie, díky čemuž je možno jednak uspořit použitý materiál pro 3D tisk, ale i čas potřebný pro vytvoření nástroje. Jako poslední kapitola v této práci je závěr, kde jsou shrnuty dosažené výsledky a jejich krátké zhodnocení.

2. Rozbor současného stavu

Od roku 1981, kdy se Hideo Kodama pokoušel najít nový systém pro vytváření rychlých prototypů, se používání 3D tisku stalo běžnou součástí strojírenských firem, zubních laboratoří ale i kutilů a nadšenců do moderních technologií. Vzhledem k dostupnosti 3D tiskáren, zejména typům FDM (Fused Deposition Modeling) a SLA (Stereolithography), které si dnes může dovolit pořídit stále větší část populace. Jako příklad masové produkce lze uvést největšího českého výrobce 3D tiskáren firmu Průša, která prodá do celého světa 9000 tiskáren měsíčně. V tomto případě se jedná o hobby tiskárny pro nadšence, za cenu kolem 30 tisíc, kterým je 3D tisk spíše zábavou, než prostředkem výdělečné, nebo výzkumné činnosti. 3D tiskárny se již nepoužívají jen k rychlému prototypování, ale stále více firem je zapojuje do kusové, ale i malosériové výroby. Jako příklad mohou sloužit výrobci obráběcích nástrojů Sandvik, Komet a Gühring. Postupem času, kdy se na trhu objevují nové materiály pro tisk, se začíná 3D tisk dostávat do popředí zájmu výrobců nejrůznějšího zboží. Nezáleží na tom, jestli se jedná o podrážky sportovní obuvi, betonové prvky fasád výškových budov, nebo diamantové nástroje pro obrábění. 3D tisk se stává běžnou součástí našeho života.

2.1. Norma ISO/ASTM 52900:2015

Aditivní výrobu popisuje norma ISO/ASTM 52900:2015 (Additive Manufacturing – General Principles – Terminology), která ji rozděluje do 7 současných výrobních procesů [1]:

Vytlačování materiálu (*Material Extrusion*) – materiál je selektivně vytlačován přes trysku nebo distribučním otvorem; metoda se používá převážně pro tisk termoplastů.

Nanášení tryskáním (*Material Jetting*) – kapičky materiálu jsou selektivně ukládány; tisknout lze polymery a vosky.

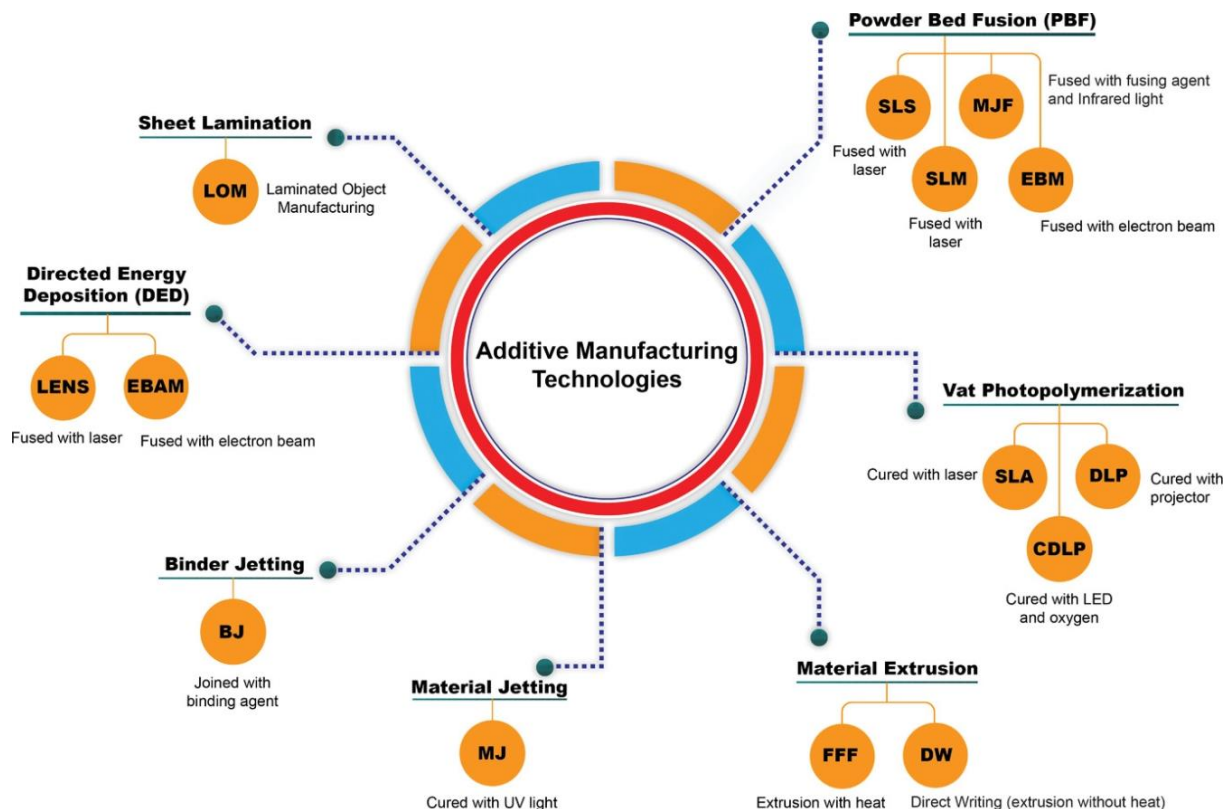
Tryskání pojiva (*Binder Jetting*) – tekuté pojivo je vrstvu po vrstvě nanášeno za účelem spojení práškových materiálů; tisknout lze kovy, písek nebo keramiku.

Laminace plátů (*Sheet Lamination*) – pláty materiálu jsou spojovány a jako celek vytvářejí model.

Fotopolymerace (*Vat Photo-polymerization*) – fotopolymerní kapalina v nádobě je vrstvu po vrstvě vytvrzována polymeračním světlem; zdrojovým materiálem pro vytvrzování je pryskyřice.

Spékání práškové vrstvy (*Powder Bed Fusion*) – přivedená tepelná energie (laserový nebo elektronový paprsek) spéká práškový kov vrstvu po vrstvě, tavit lze oceli, hliníkové a titanové slitiny, kobalt-chromové slitiny, exotické materiály atd.

Přímé energetické nanášení (*Directed Energy Deposition*) – materiál je nataven soustředěnou tepelnou energií i při změně polohy. [1]

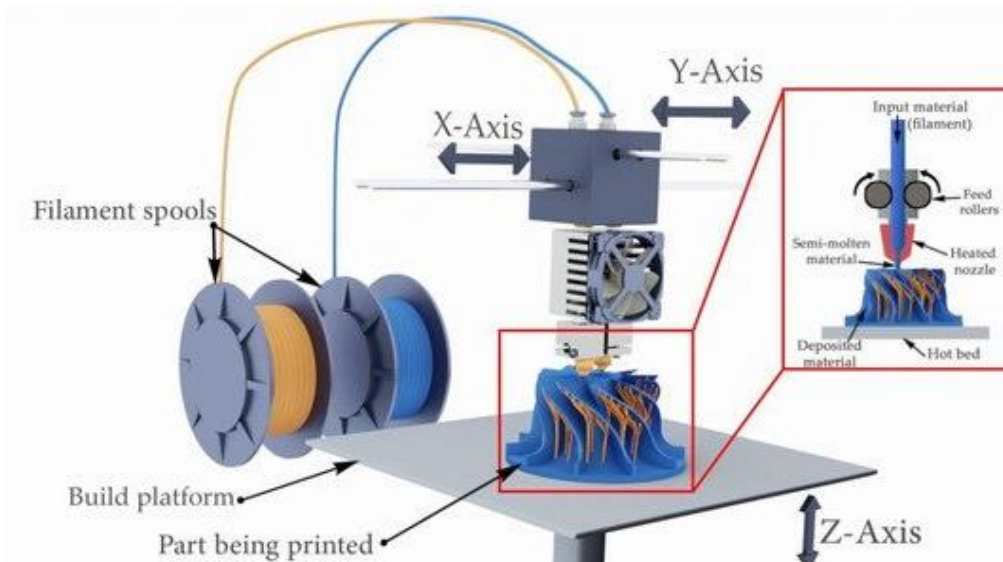


Obrázek 2-1: Rozdělení 3D tisku podle normy ISO/ASTM 52900:2015 [27]

2.2. Druhy 3D tisku

2.2.1. Vytlačování materiálu (Material Extrusion)

Technologie 3D tisku Material Extrusion využívá jako základní materiál kontinuální filament z termoplastického materiálu. Vlákno je přiváděno z cívky přes pohybující se vyhřívanou tiskovou hlavu (extrudér). Roztavený materiál je vytlačován z trysky extrudéru na tiskovou platformu. Jakmile je první vrstva dokončena, extrudér se posune o jeden horizontální krok a druhá vrstva se pak může přímo nanést na rostoucí obrobek. Vytlačování materiálu je známé jako Fused Filament Fabrication (FFF) a je jedním z nejoblíbenějších procesů pro amatérský 3D tisk. Technika vytlačování materiálu má však omezení rozměrové přesnosti a je velmi anizotropní. Lze vytlačovat širokou škálu materiálů, nejoblíbenější jsou termoplasty akrylonitrilbutadienstyren (ABS), kyselina polymléčná (PLA), houževnatý polystyren (HIPS), termoplastický polyuretan (TPU), alifatické polyamidy (PA, také známý jako Nylon) a vysoce výkonné plasty, jako je PolyEther Ether Ketone (PEEK) nebo PolyEtherimide (PEI). Pomocí této techniky 3D tisku lze navíc extrudovat materiály podobné pastě, jako je keramika, beton anebo čokoláda. Některé tiskárny jsou vybavené více tiskovými hlavami, kdy jedna hlava tiskne základní materiál a druhá podpůrný materiál, případně doplňkový materiál jako je například kompozitní vlákno. V poslední době se dodávají filameny s kombinací dvou materiálů. Jde například o částice dřeva v PLA, kovové částice v termoplastu, nebo uhlíková vlákna v termoplastu.[28]



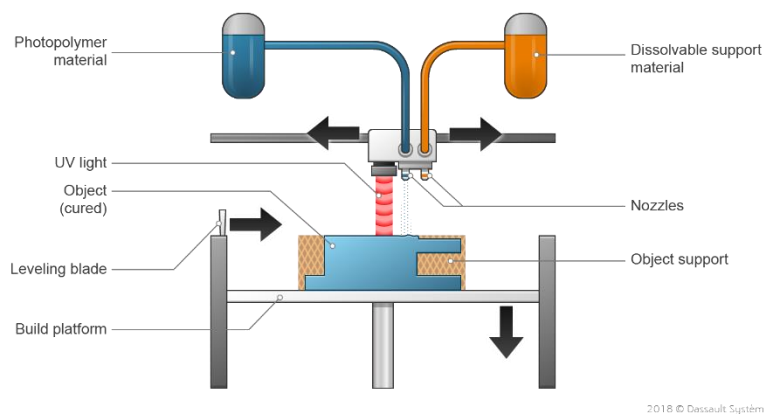
Obrázek 2-2: Schema Material Extrusion [31]



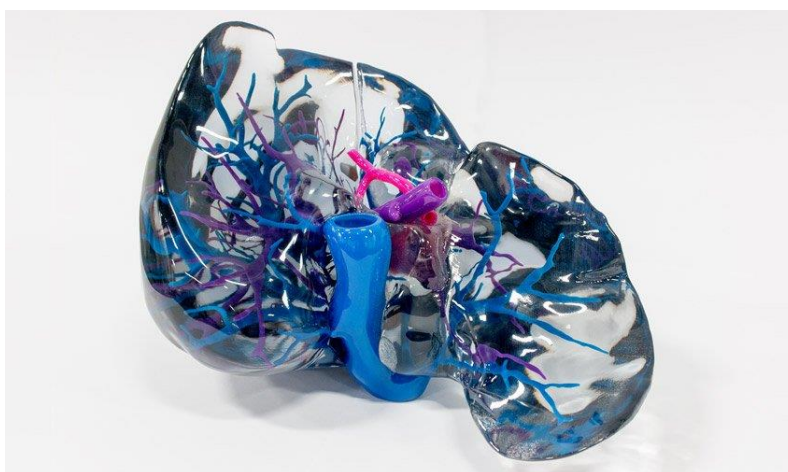
Obrázek 2-3: Tiskárna FFD [32]

2.2.2. Nanášení tryskáním (Material Jetting)

Tento proces je založen na stejném principu jako běžná dvourozměrná inkoustová tiskárna. Materiál ve formě kapiček kapaliny je dávkován z tiskových hlav podobných těm v inkoustové tiskárně. Materiál je fotosenzitivní polymer, který tvrdne vystavením UV světlu, které je součástí tiskové hlavy. Součástí je vytváření vrstvy po vrstvě. Proces tryskání materiálu vyžaduje podporu, která se často tiskne současně během stavby z rozpustného materiálu. Podpůrný materiál je poté odstraněn během kroku následného zpracování. Tato technologie se používá pro výrobu dílů s vysokou rozměrovou přesností, hladkým povrchem a rozsáhlou paletou barev. Díly lze tisknout v lesklém i matném provedení. Nevýhodou této technologie je vysoká cena a skutečnost, že UV-aktivované fotopolymery časem ztrácejí mechanické vlastnosti a mohou se stát křehkými.[28] [29]



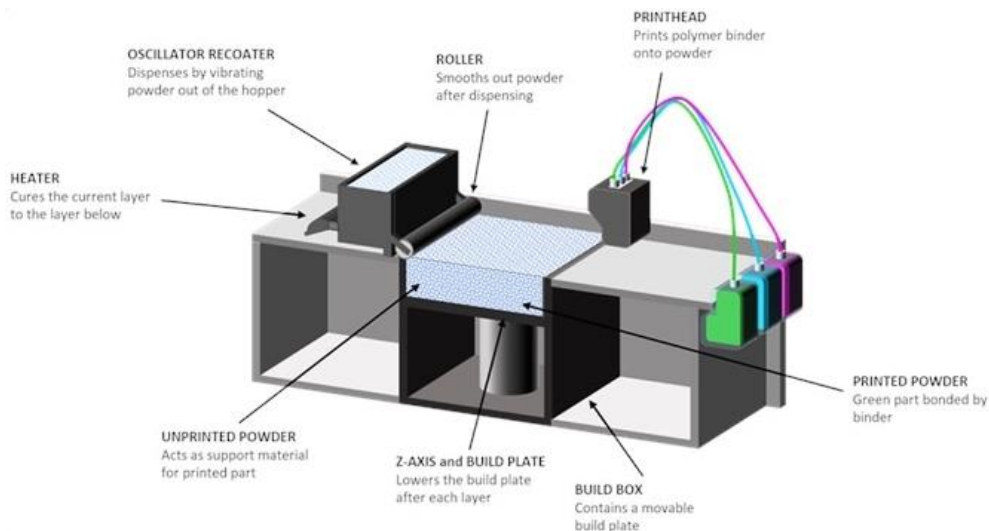
Obrázek 2-4: Schema Materiál Jetting [28]



Obrázek 2-5: Výrobek vytvořený metodou Materiál Jetting [33]

2.2.3. Tryskání pojiva (Binder Jetting)

Při této metodě jsou používány dva druhy materiálů. Práškový základní a pojivový materiál. Práškové materiály mohou být na bázi keramiky (sklo, sádra) kovu (nerezová ocel) nebo písku. Během procesu tisku se tisková hlava s pojivem, obvykle tekutým, pohybuje nad stavební platformou ve směru X a Y a nanáší kapičky pojiva. Tiskne každou vrstvu podobným způsobem jako 2D tiskárny, které tisknou inkoust na papír. Po každé vrstvě tisku stavební plocha klesne a na předchozí vrstvu se nanese nová vrstva prášku. Tisková hlava znovu obkreslí příčný řez modelu a spojí předchozí a aktuální vrstvu dohromady. Nepoužitý prášek působí jako podpora předmětu a proto není potřeba žádná nosná struktura. Po vytištění jsou díly v nedokončeném stavu (tzv. zelené díly) a vyžadují dodatečné zpracování, než budou připraveny k použití. To obnáší očištění a následné slinování v peci. Finální tisky nejsou určeny pro funkční aplikace, protože zůstávají porézní a musí být chráněny před vlhkostí, aby nedošlo ke změně barvy. [28] [29]



Obrázek 2-6: Schéma Binder Jetting [34]

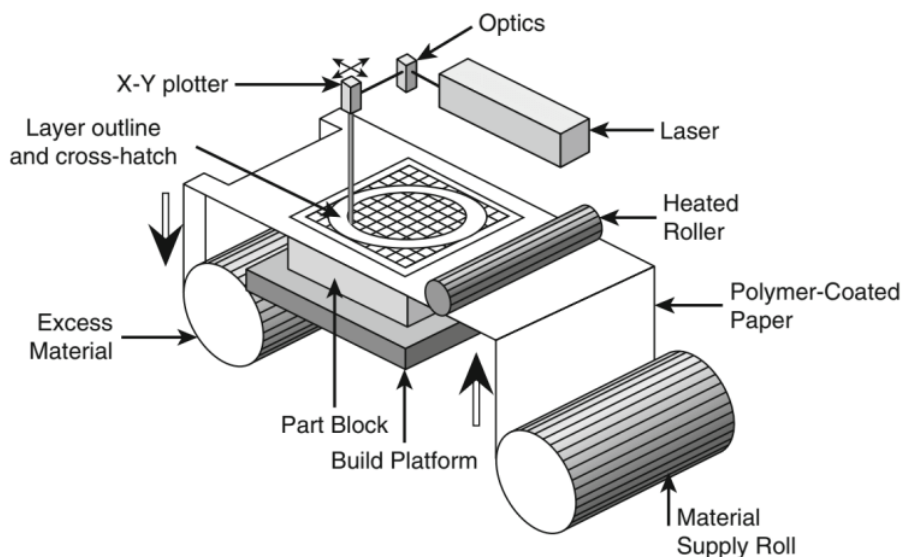


Obrázek 2-7: Výrobky vytvořené metodou Binder Jetting [35]

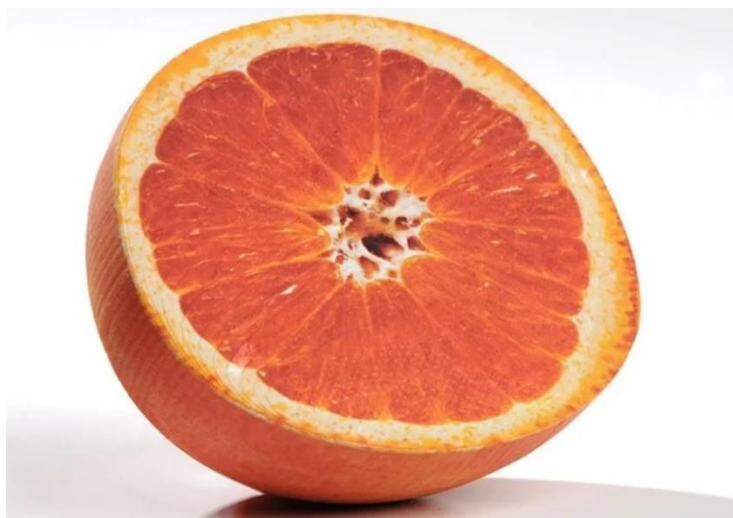
2.2.4. Laminace plátů (Sheet Lamination)

Proces laminace plátů zahrnuje dva typy výrobních technik, ultrazvukovou aditivní výrobu (UAM) a výrobu laminovaných předmětů (LOM). V Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) jsou plechy nebo pásy kovu spojeny dohromady pomocí ultrazvukového svařování. Po svaření dílec nevyžaduje žádný další krok obrábění nebo odebrání materiálu. Různé kovy jako hliník, měď, ocel a titan lze spojovat dohromady, což umožňuje větší flexibilitu v požadavcích na pevnost součástí. Laminated Object Manufacturing (LOM) používá listy papíru jako základní materiál a lepidlo místo svařování. Papír je podáván pomocí válečků a laser obkresluje průřez předmětu. Během procesu tisku je použita metoda křížového šrafování na plochy mimo finální výrobek, takže dokončený díl lze snadno vyjmout. Předměty vyrobené pomocí LOM nejsou vhodné pro konstrukční použití a mohou být použity pouze pro estetické účely. Nejnovější vývoj SL umožnil použití desek z uhlíkových vláken a různých kompozitů. Papírové modely mohou být plně barevné, mají vlastnosti podobné dřevu a mohou být podle toho opracovány a zpracovány. Přesnost výsledku závisí především na tloušťce použitého vrstveného

materiálu, jako je například list papíru. Standardní list papíru má tloušťku v rozmezí 50 až 100 μm . Composite Based Additive Manufacturing (CBAM) kompozity vyztužené vlákny jsou spojeny s termoplastem a vytvářejí velmi pevné části. Selektivní laminování kompozitních objektů (SLCOM) od EnvisionTEC je technologie, u které jsou používány termoplasty s tkaným vláknitým kompozitem jako základní materiál. Díky tomu je možné přímo vyrábět funkční lehké technické komponenty pro letecký a automobilový průmysl, a to za velmi konkurenceschopnou cenu. [28] [29]



Obrázek 2-8: Schéma Sheet Lamination [37]

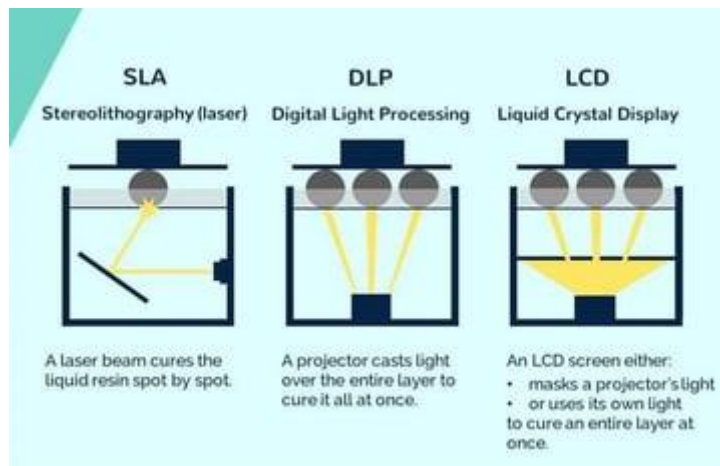


Obrázek 2-9: Výrobek vytvořený metodou sheet lamination[36]

2.2.5. Fotopolymerace (Vat Photo-polymerization)

Tato technologie 3D tisku pracuje na principu selektivního vytvrzování kapalného fotopolymeru, kdy se vrstva po vrstvě staví 3D objekt. Kromě nejstarší techniky, která je založena na laserech, existuje ještě několik typů vytvrzovacích zařízení. Jsou to projektory s digitálním zpracováním světla a LCD obrazovky, které slouží jako maska pro osvětlení celé vrstvy najednou. K osvětlení dochází za kratší časový interval než u laseru, který musí postupně osvětlovat celý povrch tenkým paprskem. U techniky fotopolymerizace jsou dva různé přístupy, jak vytvářet díl na rozhraní mezi poslední vrstvou a povrchem nádrže s pryskyřicí. Přístup shora dolů

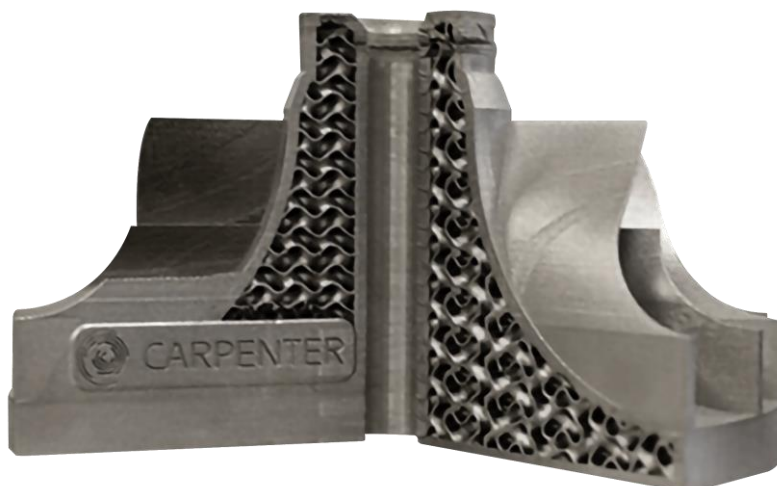
má umístěný zdroj pro vytvrzování pod vanou. Platforma pro tisk postupně stoupá nad nádrž a součást je stavěna vzhůru nohama. Opačná technika má umístěný zdroj nad hladinou a platforma se postupně ponořuje. Tato technologie je jak pro prototypování, tak i pro sériovou výrobu. Díly mají hladkou povrchovou úpravu a jemné detaily. Fotopolymerní pryskyřice jsou dostupné v různých barvách i stupních tvrdosti.[28]



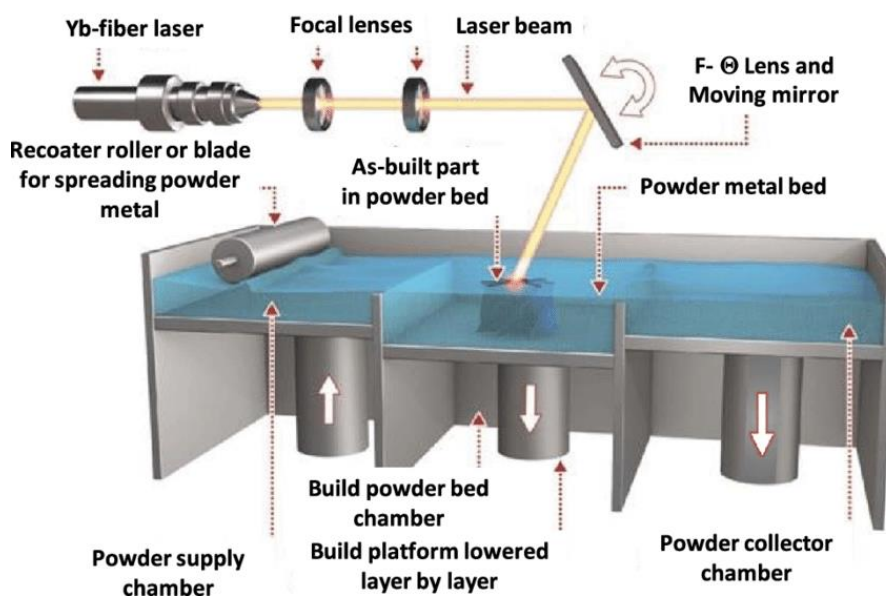
Obrázek 2-10: Druhy vytvrzování fotopolymerních pryskyřic [57]

2.2.6. Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion)

Proces fúze v práškovém loži využívá laser nebo elektronový paprsek ke spékání, nebo tavení částic prášku dohromady, zatímco sleduje průřez vytvářeným předmětem. Po dokončení vrstvy klesne stavěcí platforma o předem stanovenou tloušťku vrstvy dolů, jednotka pro dávkování nanese novou vrstvu prášku a tisk pokračuje další vrstvou. Tento proces pokračuje, dokud není postaven celý objekt. Do výrobního procesu spékání práškové vrstvy řadíme například technologie SLS (selektivní laserové slinování) u této technologie je zvláštností, že vytištěný model je větší, nazývá se zelený a po očištění se musí ještě tepelně zpracovat v peci, než se z něho stane finální díl s přesnými rozměry. Další technologií jsou DMLS (přímé laserové slinování kovů), SLM (selektivní laserové tavení) a EBM (tavení elektronovým paprskem). Při tavení elektronovým paprskem vznikají ve výtisku menší zbytková napětí v porovnání s laserem, což má za následek menší deformace. Zároveň spotřebovává méně energie a je rychlejší než SLS. Technologií MJF (Multi Jet Fusion) se spéká polymerní prášek. Na rozprostřenou vrstvu prášku se tiskovou hlavou nanese speciální inkoust, který napomáhá absorpci infračerveného záření. Poté se plocha osvítil infračervenou lampou a dojde k vytvrzení pouze těch míst, na kterých je nanesen tento speciální inkoust. [28] [29] [30]



Obrázek 2-11: Propagační předmět vytvořený metodou Powder Bed Fusion [39]



Obrázek 2-12: Schéma metody Powder Bed Fusion[38]



Obrázek 2-13: Znázornění technologického postupu při metodě SLS [26]

2.2.7. Přímé energetické nanášení (Directed Energy Deposition)

Přímé nanášení kovů je technologie, při které se díly vytvářejí přímým tavením materiálů a jejich ukládáním na obrobek, vrstvu po vrstvě. Materiál je ve formě drátu, nebo prášku, který je taven pomocí laseru, případně elektronového paprsku. Materiál je přiváděn tryskou, která je namontována na víceosém rameni. Jsou zde využívány nejen kovové materiály jako kobalt,

nikl, chrom, tantal, nástrojová ocel, nerezová ocel, slitiny mědi, ale i sklo, polymery a keramika. Kromě schopnosti vyrábět nové díly (často s hybridizací frézovacího/soustružnického CNC stroje), je možné touto technologií opravit složité poškozené díly, jako jsou například lopatky turbíny. Většina 3D tiskáren DED jsou průmyslové stroje s velmi velkými půdorysy, které ke svému provozu vyžadují uzavřené a kontrolované prostředí. Termín přímá depozice energie může zahrnovat několik různých technologií. Vyznačují se způsobem tavení materiálu, z nichž každý je vhodný pro jiné a specifické účely. Výrobní systémy LENS využívají lasery ke stavbě objektů vrstvu po vrstvě přímo z práškových kovů, slitin, keramiky, nebo kompozitu. Proces LENS musí probíhat v hermeticky uzavřené komoře, která je naplněna argonem, aby hladiny kyslíku a vlhkosti zůstaly velmi nízké. To udržuje díl čistý a zabraňuje oxidaci. Kovový práškový materiál je dodáván přímo do nanášecí hlavy. Technologie 3D tisku Optomec Aerosol Jet poskytuje nákladově efektivní, škálovatelný proces tisku funkčních antén a senzorů přímo na spotřební a průmyslové komponenty, což z nich dělá chytrá zařízení internetu věcí (IoT). Možné tištěné antény jsou LTE, NFC, GPS, Wifi a WLAN. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) používá k tavení materiálu elektronový paprsek. Společnost DG MORI zakomponovala technologii LDW do pětiosé frézky a kombinuje flexibilitu procesu nanášení kovu laserem s přesností procesu frézování. [28] [29]



Obrázek 2-14: Metoda Directed Energy Deposition [40]



Obrázek 2-15: Hybrid Manufacturing [41]

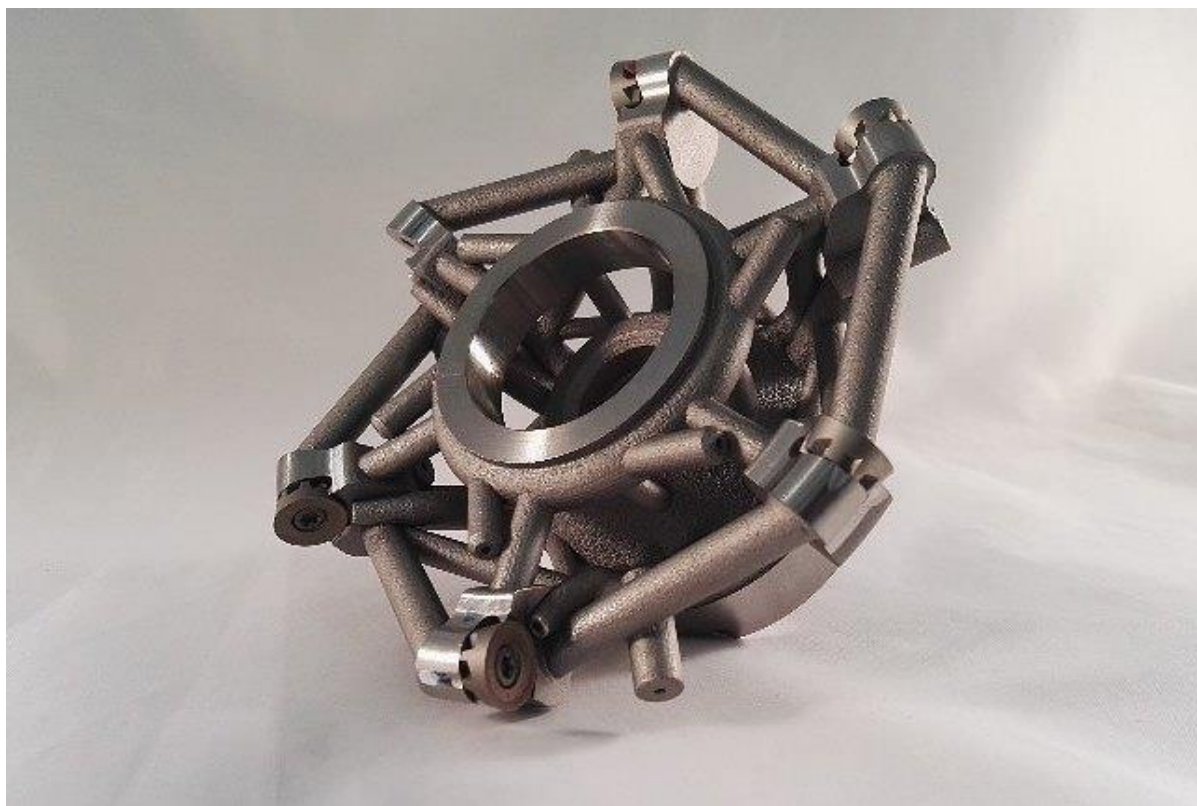
2.3. Optimalizace

Z důvodů zlepšení vlastností frézovacích nástrojů se v posledních letech začíná využívat různých softwarových nástrojů pro optimalizaci. Je to výhodné například pro dosažení lepšího poměru hmotnosti a tuhosti. Tento poměr je důležitý pro zlepšení dynamických vlastností, kterými se zvyšuje přesnost a rychlost obrábění.

Jedna z institucí, která se na vysoké úrovni zabývá optimalizací nástrojů a konkrétně i frézovacích hlav je Regionální technologický institut při Západočeské univerzitě. V poslední době představili pracovníci tohoto institutu několik zajímavých řešení v oblasti optimalizace frézovacích hlav.

Mezi tyto projekty patří i frézovací hlava Kraken, u které se díky úpravě designu a konstrukčně technologickému řešení snížila hmotnost o úctyhodných 60 %. Inovován byl i vnitřní systém přívodu chladicí kapaliny, která je nyní přiváděna na čelo a hřbet VBD. Zároveň proběhla i úprava výstupu chlazení na tyto dvě nejvíce namáhané části VBD, díky čemuž je možné obrábět o 10–40 % produktivněji. Zároveň se tímto podařilo prodloužit i trvanlivost břitů o 10–200 % podle druhu obráběného materiálu. Díky prutové konstrukci má tento nástroj téměř stejnou tuhost a pevnost jako konvenčně vyráběný nástroj. Těchto vlastností bylo dosaženo díky aditivní výrobě, která přináší designově neomezené možnosti. Na následujícím obrázku 2-16 je vidět prutová konstrukce, která účinně rozkládá síly vzniklé při obrábění, ale slouží i k rozvodu procesní kapaliny. [11]

U optimalizace této frézovací hlavy nebyl použit žádný optimalizační software, Vycházelo se z potřeby nejúčinněji rozložit síly vzniklé při obrábění a zefektivnit chlazení řezných částí nástroje. K přenosu sil bylo použito prutové soustavy.

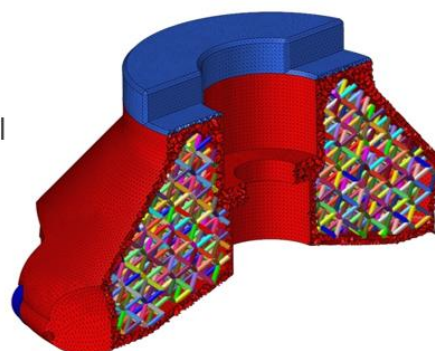
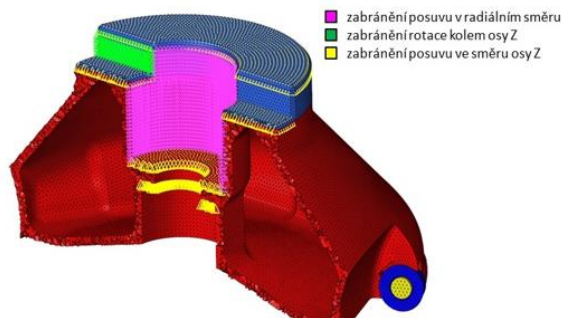


Obrázek 2-16: Fréza Kraken [43]

Jako druhý projekt může být uvedena optimalizace frézovací hlavy, na které spolupracovali akademičtí pracovníci RTI při ZČU, Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice a specialisté ze společnosti Advanced Engineering.

„V úvodních fázích výzkumu byly zkoumány možnosti topologických optimalizací dvoubřitých fréz bez výraznějších tvarových omezení. Tyto činnosti vedly ke vzniku velmi zajímavých tvarových konceptů, které by však v provozu narážely na omezující faktory vyplývající z provozních podmínek (především pak možného zachytávání obrobeného materiálu tělem frézy). Proto bylo po skončení této etapy přistoupeno k řešení, které zachovává vnější povrchovou obálku původního tvaru frézy a topologické optimalizace jsou prováděny na vnitřní, původně vyplněné struktuře. Takové tvarové úpravy by kvůli vzniku dutin nebyly dříve možné, jejich výrobu umožnil až příchod kovové aditivní výroby, jež se stává trendem současného strojírenství a slibuje velký potenciál i v budoucnu. Výpočtová část projektu byla zpracována pomocí softwarových nástrojů od společnosti Altair, především pak implicitního optimalizačního řešiče pro metodu konečných prvků Altair OptiStruct. Po počátečních obecných topologických optimalizacích pro získání přehledu o ideálním rámcovém tvaru omezeném různými požadavky, včetně vedení chladicích kanálků, přistoupil řešitelský tým k návrhu využívajícímu tzv. porézni trámčité struktury. Jedná se de facto o uspořádanou trojrozměrnou mřížku složenou z relativně malých prutů. Taková struktura si při velmi výrazném snížení hmotnosti oproti plnému materiálu poměrně dobře zachovává původní pevnostní charakteristiky. Výhodou těchto struktur je zároveň jejich robustnost ve smyslu odolnosti proti šíření trhlin a skutečnost, že chladicí médium může v případě potřeby proudit celým vnitřním objemem dílu. Výzvou v návrhu vhodné trámčité struktury bylo nejenom zabezpečení její bezproblémové tisknutelnosti (jednotlivé pruty nemohou mít sklon od vertikály vyšší než přibližně 45°), ale především zajištění rotační symetrie podle osy otáčení frézy. Toho bylo nakonec dosaženo rozdělením vnitřního objemu do 6 sektorů, z nichž každý byl vyplněn porézni trámčitou strukturou s BCC (Body Centered Cubic) typem základní buňky tak, že v každém ze sektorů byla struktura pootočena o 60° podle osy rotace ve středu frézy. Tím bylo zároveň dosaženo toho, že na rozhraních sektorů na sebe mřížka navazovala a jednotlivé pruty se vhodně protnuly. Na takto navržené mřížce byla řešena ještě tzv. lattice optimalizace, což je výpočtová metoda v Altair OptiStruct, která umožňuje každému z tisíců prutů v mřížce individuálně přiřadit ideální tloušťku podle toho jak je který prut zatěžován, nebo jaký má vliv na celkovou tuhost. Při srovnání s variantou, jejíž vnitřní prostor je celý vyplněn materiálem, lze uvést, že se podařilo vyvinout frézu, jež má díky nižší hmotnosti výrazně lepší dynamické vlastnosti, vhodnější vlastní frekvenci, a přitom stále splňuje požadavky na její tuhost. Pro další fázi vývoje, na níž byly práce již zahájeny, vidí výzkumný tým potenciál především ve využití lattice optimalizace v kombinaci s optimalizací topologickou. To by umožnilo nevyplňovat mřížkou celý vnitřní prostor, ale jen části, které mají na výsledné vlastnosti nezanedbatelný vliv, a zbytek prostoru nechat prázdný. To pak v ekonomické rovině může znamenat ještě výrazně vyšší úspory ve výrobě nebo provozu.“ [12]

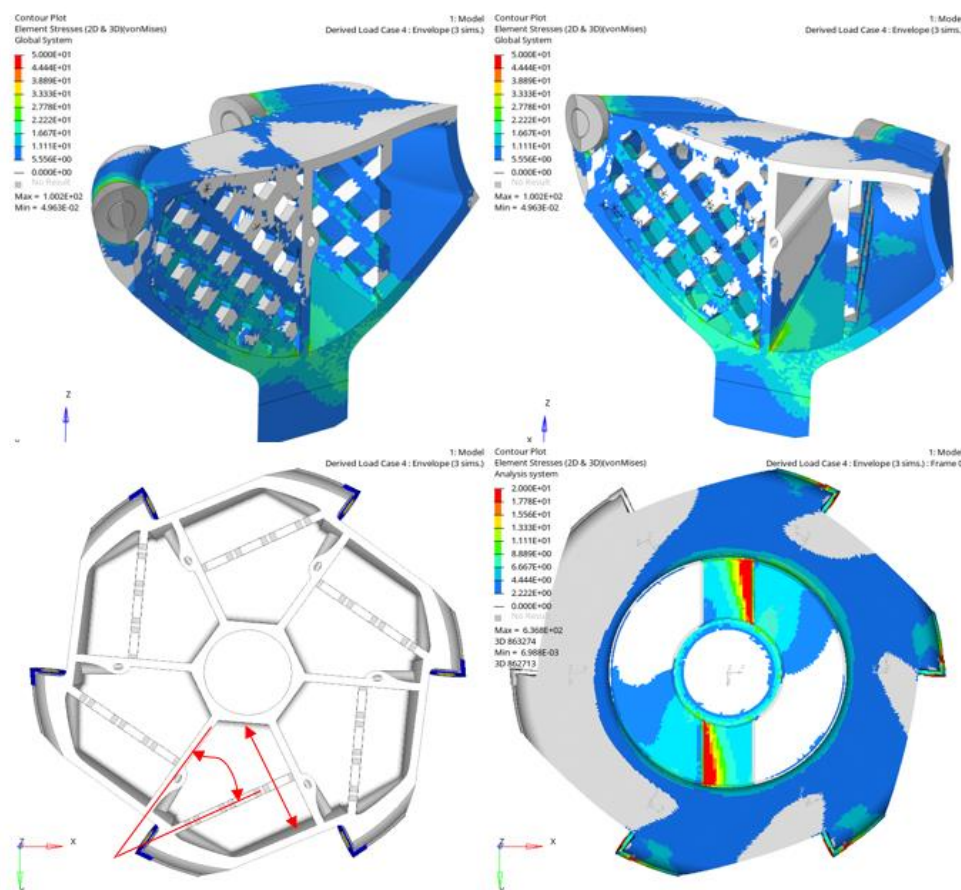
- ▶ Statická analýza v lineární oblasti deformací
- ▶ Mezi jednotlivými komponenty byly vytvořeny TIE vazby pro přenos smykových a normálových sil
- ▶ HyperMesh



Výpočetní model tvořený z 3D-TETRA4 a 1D-CBEAM prvků

Vazby pro rotačně symetrickou úlohu mezi frézou a upínačem

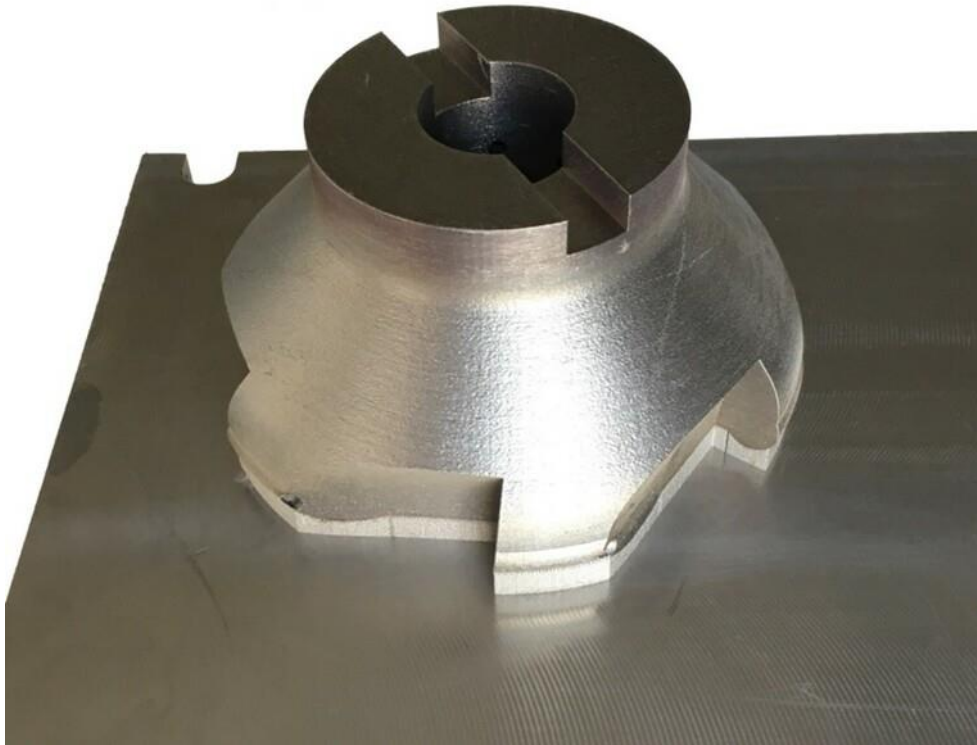
Obrázek 2-17: Vnitřní struktura frézy Medúza [60]



Obrázek 2-18: Vnitřní struktura frézy Medúza [60]

Nejnovější frézovací hlava z produkce RTI při západočeské univerzitě nese název Medúza. Ta je navržena pro výrobu 3D tiskem z kovu a určena pro produktivní obrábění žáruvzdorné slitiny Inconel718. Díky použití aditivní technologie při výrobě bylo možné v těle frézy vytvořit soustavu kanálků, které mají proměnný průtok chladicí kapaliny a zároveň speciálně tvarované dýzy, které přesně přivádí kapalinu do místa řezu. To má velice kladný vliv na obráběcí proces.

Díky rapidnímu snížení hmotnosti, při zachování tuhosti v radiálním i axiálním směru, již není zatěžováno vřeteno obráběcího stroje tak jako u konvenčního nástroje s plným tělem. Všechny tyto změny vedly ke zlepšení produktivity při obrábění. [44]



Obrázek 2-19: Fréza Medúza [44]

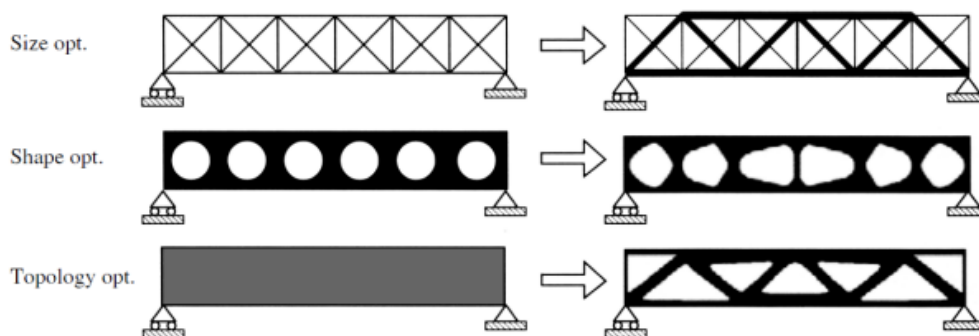
2.4. Strukturální optimalizace využívaná u 3D tisku nástrojů

Jeden z prvních pohledů na téma optimalizace přinesl australský strojní inženýr Anthony George Maldon Michell, který na začátku 20. století publikoval článek o strukturální optimalizaci. Vzhledem k tomu, že takzvané Michaelovi vazníky mají nekonečné množství konstrukčních součástí, jsou ve strojírenských aplikacích spíše nepraktické. Jistý posun následoval v 60. letech 20. století, když byl představen takzvaný přístup pozemních struktur. Původně byly problémy pozemních struktur řešeny pomocí metod přímé optimalizace, tzn. algoritmy matematického programování (MP). Při řešení velkých optimalizačních problémů však byly a stále jsou neefektivní. Na druhou stranu jsou algoritmy MP vhodné pro všechny druhy objektivních funkcí a omezení. K vyřešení realistického optimalizačního problému je třeba použít poměrně velkou doménu návrhu, a v důsledku toho mohou algoritmy MP omezit použití. Místo MP algoritmů lze k řešení strukturálních problémů použít nepřímé optimalizační metody, tj. algoritmy optimality criteria (OC). Při optimalizaci OC je nutné stanovit vhodné kritérium, na kterém je založena optimalizace řešení. Kritérium může souviset například s konstrukčním napětím: často se předpokládá, že pro vazník s nejmenší hmotností podléhá každý prut odpovídající dovolené hodnotě napětí. Přístup založený na výše uvedených kritériích se také nazývá metoda plně namáhaného návrhu (FSD). V plně namáhaném stavu je každý konstrukční prvek vystaven maximální dovolené hodnotě napětí. Pokud jsou mezní napětí stejná pro každý konstrukční prvek, je výsledná struktura FSD také namáhána stejně. Nejčastěji je v literatuře stejně stresovaný stav nazýván také plně vystresovaný. Ve srovnání s MP algoritmy jsou OC metody účinné ve velkých optimalizačních problémech, ale postrádají obecnost v různých typech

minimalizačních problémů. V literatuře je optimalizace topologie nejčastěji aplikována na designové domény příhradových pozemních konstrukcí. Byly však vyvinuty optimalizační postupy pro řešení obecných problémů optimalizace rozvržení, ve kterých se používají domény návrhu kontinua. Značná pozornost byla věnována práci Bendsøeho a Kikuchiho, kteří jako první představili tzv. homogenizační metodu. Zde je designová doména konstruována z konečného počtu buněk, z nichž každá může mít individuální mikrostrukturu, a navíc každá buňka může mít buď materiál, nebo obdélníkovou dutinu. Vzhledem k velkému počtu návrhových proměnných se metody OC obvykle používají v problémech založených na homogenizaci. V roce 1993 představili Y.M. Xie a G.P. Steven přístup zvaný evoluční strukturální optimalizace (ESO). ESO vychází z jednoduché myšlenky, že optimální strukturu (maximální tuhost, minimální hmotnost) lze vyrobit postupným odstraňováním neefektivně používaného materiálu z designu domény. Obecně evoluční optimalizační metody nemají pevné teoretické pozadí a jejich konvergence je zatím neprokázaná. Evoluční metody napodobují přirozený výběr, tedy přežití těch nejlepších, a evoluci pozorovanou mezi živými organismy, a předpokládá se, že to vede k optimálnímu řešení.[13]

Konstrukční inženýr pracující v oblasti výzkumu a vývoje musí často navrhovat zcela nové konstrukce. Zatížení a podmínky konkrétního konstrukčního problému jsou obvykle známy předem, ale projektant si není jistý, jak by měla skutečná konstrukce vypadat. Je známo, že hmotnost je jedním z hlavních faktorů konečných nákladů na nosné konstrukce, a proto je snížení hmotnosti často stanoveno jako hlavní cíl projektového úkolu. Mohou existovat dřívější návrhy pro podobný konstrukční problém, ale není pravděpodobné, že by změna velikosti předchozích návrhů byla přínosná. Projektant by se mohl pokusit problém vyřešit intuitivně na základě svých dřívějších zkušeností, ale tento přístup je pracný a není zárukou uspokojivého výsledku. Alternativně lze k výše popsanému konstrukčnímu problému přistoupit strukturální optimalizací. Strukturální optimalizace se často dělí do tří tříd: změna velikosti, geometrie a optimalizace topologie. Pro změnu velikosti a geometrickou optimalizaci je charakteristické, že topologie konstrukce nemůže být během optimalizačního procesu ovlivněna. Při použití těchto metod není zaručeno, že získaná struktura je nejlepší nebo dokonce dobrá: jiná počáteční topologie by mohla přinést pozoruhodně lepší řešení problému. Protože optimalizace topologie hledá nejlepší celkovou topologii splňující omezení problému, nelze proces optimalizace snadno oklamat špatným počátečním odhadem. Z tohoto důvodu je optimalizace topologie skutečně nejlepší metodou pro řešení výše uvedeného konstrukčního problému a pro vytvoření nejlepší celkové struktury.[13]

V problematice mechanického navrhování vznikla koncepce strukturální optimalizace, v níž se zvlášť nebo i současně optimalizuje velikost, tvar a topologie výrobku. Tyto koncepce jsou velmi důležité pro nalezení optimální velikosti, tvaru a rozložení materiálu během procesu vývoje výrobku. Jak je znázorněno na obrázku 2-20, optimalizace velikosti se zabývá optimalizací velikosti objektu (délky, šířky nebo hloubky); zatímco optimalizace tvaru spočívá v nalezení optimálního tvaru součásti nebo otvorů v dílu, zatímco optimalizace topologie se zabývá optimalizací celé geometrie dílu zahrnující jak velikost, tak tvar.[14]



Obrázek 2-20: Optimalizace velikosti, tvaru a topologie [14]

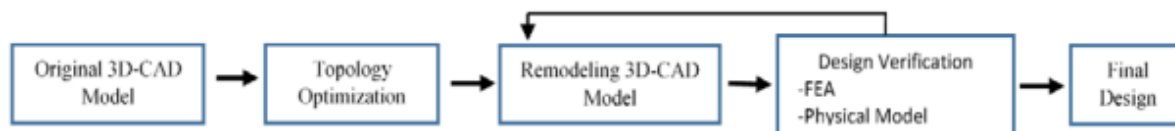
2.4.1. Topologická optimalizace

Je matematický nástroj pro optimalizaci rozložení materiálu v navrhovaném dílu. Tímto způsobem získáme topologii dílu, která je přirozenější a komplexnější. V posledních třech desetiletích byly vyvinuty různé přístupy k optimalizaci topologie. Mezi hlavní techniky topologické optimalizace patří například přístup založený na úrovni množin, metoda homogenizace, metoda SIMP a přístup založený na hustotě. Původní vývoj topologické optimalizace zohledňoval konvenční výrobní techniky, které jsou buď subtraktivní, nebo formativní. Tyto konvenční výrobní systémy mají omezení při výrobě složitých tvarových geometrií, protože mají různá výrobní omezení. Zrod aditivní výroby poskytl další skvělou příležitost do budoucna pro optimalizaci topologie, protože s aditivními výrobními technologiemi (AM) je možné vyrábět složité tvarové geometrie. Je to proto, že v systémech AM není k výrobě dílu zapotřebí žádný nástroj. Pro tuto a další podobné možnosti technologií jsou optimalizace topologie a aditivní výroba považovány za ideální dvojice.

Pro zavedení technologie AM do výroby funkčních dílů se za klíčové oblasti současného výzkumu považuje pokrok v oblasti technologie materiálů a optimalizace konstrukce. Pokud jde o posledně zmíněnou výzkumnou výzvu, hledá se přístup k návrhu, který by dokázal přímo přenést návrhovou koncepci konstruktéra na vyráběný díl bez náležitého zohlednění výrobních omezení a umožnil optimální využití dílu při zatížení. Pokud budou vyvinuty vhodné a účinné algoritmy, mohou techniky optimalizace topologie hrát klíčovou roli v budoucím vývoji technologie AM. [14]

Topologická optimalizace je jednou z technik strukturální optimalizace, která optimalizuje rozložení materiálu ve stanoveném konstrukčním prostoru pro dané zatížení a okrajové podmínky, přičemž je splněn požadavek na výkonnost výrobku. Většina technik topologické optimalizace se provádí kolektivním využitím konceptu počítačem podporovaného navrhování (CAD), konceptu analýzy konečných prvků (FEA) a různých optimalizačních algoritmů s ohledem na různé výrobní techniky, jak je uvedeno na obrázku 2-21 proces optimalizace topologie [4]. Využití CAD při optimalizaci topologie spočívá v tom, že se vytvoří hrubý/počáteční model výrobku, který má být optimalizován, zatímco metoda konečných prvků se používá k zobrazení rozložení napětí a posunutí v celém výrobku. Optimalizace topologie se provádí za účelem odstranění oblasti dílu, které dostatečně neunesou působící zatížení a nepodléhají významnému zatížení. deformaci a nepřispívají tak k celkové výkonnosti dílu. Na základě požadavku konstrukčního problému se používají různé optimalizační algoritmy k odstranění části materiálu ve výrobku, které nepřenášejí aplikované zatížení. Kromě toho se provádí optimalizace topologie, aby byly splněny určité cíle návrhu a zachována jeho omezení. Na základě řešeného problému může být cílem minimalizovat poddajnost součásti, tj. maximalizovat tuhost součásti. Omezeními mohou být maximální přípustná deformace, maximální hmotnostní podíl atd. Optimalizace topologie

nástroje vytvářejí komplexní přirozený tvar, který zobrazuje odstranění materiálů na základě cílů a omezení stanovených v problému návrhu. Návrh se poté zpracuje v softwaru CAD, aby se získal hladký a výrobitelný díl podle tvaru vygenerovaného z procesu optimalizace topologie. V konečném důsledku, je finální optimalizovaný návrh ověřen pomocí nástrojů konečných prvků, aby výrobek splňoval požadavky na konstrukci a své celkové parametry.[14]



Obrázek 2-21: Proces optimalizace topologie [14]

Aditivní výroba již ve fázi přípravy nabízí možnosti, jak výrobek optimalizovat. Díky flexibilitě, které je možné s touto technologií dosáhnout je možné vytvářet takové geometrické tvary, které doteď nebyly s konvenčními technologiemi možné vyrobit. [16]

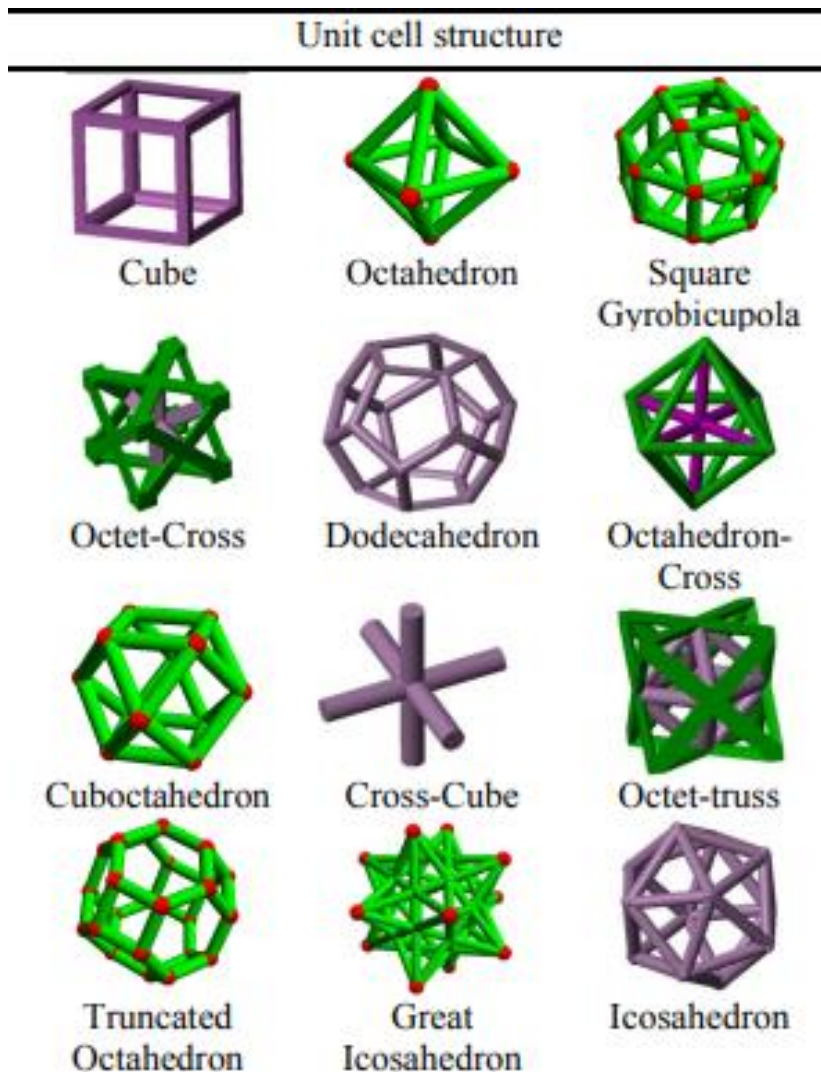
Jednou z jedinečných možností výroby pomocí 3D tisku je porézní trámčitá (mřížková) struktura. Při použití těchto struktur je možné dosáhnout u výrobku vlastnosti, které jsou velice přínosné. Jsou to například snížení hmotnosti, nebo zlepšené tepelné vlastnosti. Přínosem pro chlazení nástroje je, že takto vytvořeným vnitřním prostorem může procházet chladicí kapalina, celý ho vyplňovat a tím dopomáhat k lepší účinnosti chlazení. Porézní trámčité struktury jsou také často využívány v lékařství, konkrétně v biomedicíně, kde jsou díky možnosti prorůstání tkáně do vnitřní struktury implantátu často používaným prvkem. „Při navrhování těchto struktur se provádí zpravidla dvoufázová optimalizace. Nejprve se přistoupí k topologické optimalizaci, která zvolí nejlepší rozmístění materiálu v návrhovém prostoru, a následně se ve druhé fázi tento navržený tvar proloží trámčitou strukturou, na které jsou optimalizovány průměry jednotlivých trámek podle toho, jak výrazně jsou zatěžovány.“[16]

2.4.2. Odlehčená struktura (lattice structure)

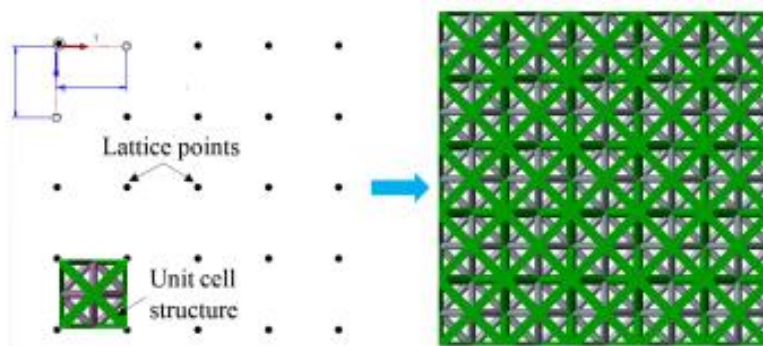
Tento typ optimalizace je možný jen u aditivní výroby. Oproti konvenčním výrobním způsobům je možné díky aditivní technologii vytvářet téměř libovolné tvary. Výhody mřížkových struktur jsou především nižší hmotnost a úspora materiálu.

Pro aditivní výrobu se používají dvě metody generování mřížkové struktury, a to vytváření periodické mřížky v prostoru, nebo neperiodické mřížky v prostoru a na povrchu součástí.

Při generování periodické mřížkové struktury je nejprve potřeba vytvořit knihovnu s jednotkovými tvary buněčné struktury. Následně se vytvoří vrstva jednotkových buněčných struktur, z té objem mřížkové struktury, který se nakonec ořízne podle prostoru výrobku. [15]



Obrázek 2-22: Příklady jednotkových tvarů buněčné struktury [15]



Obrázek 2-23: Vrstva jednotkových buněčných struktur [15]

Neperiodická mřížová struktura je nerovnoměrná a vytváří se pomocí numerického modelu výrobku vytvořeného v CAD softwaru, který se použije k vytvoření sítě konečných prvků. Velikost síťovacího prvku se volí v závislosti na hmotnostním poměru výrobku, který je třeba snížit, a na mechanických vlastnostech materiálu a povrchové struktuře výrobku. [15]

2.5. Optimalizace 3D tisku výrobců nástrojů (fréz)

„Tisk rezných nástrojů, případně těles, jako nosičů VBD je dnes ve velkých společnostech vyrábějící rezné nástroje běžně zavedenou praxí. 3D tisk vrtacích těles s VBD a vnitřním systémem chlazení využívají například firmy Mapal, Kerametal, Iscar, Sandvik a další. Na druhou stranu na první pohled u těchto nástrojů není hned zřejmé, že tělesa byla vytištěna, neboť u nich není plně využít potenciál této technologie. Asi největší inovaci provedla firma Sandvik, která využila topologické optimalizace u jejich nejčastěji nasazované frézovací hlavy, a díky tomu vznikl unikátní tvar v oblasti rezných nástrojů“ [11]

2.5.1. Sandvik Coromant odlehčená fréza CoroMill® 390



Obrázek 2-24: Fréza CoroMill® 390 [18]

Fréza CoroMill® 390 od společnosti Sandvik Coromant je vyráběna aditivní technologií ze slitiny titanu s názvem Osprey od společnosti Sandvik. „Malé zkrácení délky a snížení hmotnosti části těla nástroje mezi břity a tlumícím mechanismem Silent Tools™ umožňuje zvýšení hloubky řezu a díky tomu výrazné zvýšení produktivity při práci s dlouhým vyložením nástroje.“ [18] Použití frézy je pro čelní frézování s vyložením nástroje přesahujícím čtyřnásobek průměru frézy. Následující tabulka 1 porovnává konvenčně vyrobenou frézu a frézu vyrobenou aditivní technologií. Z tohoto porovnání je vidět zvýšení produktivity úběru materiálu. Při návrhu odlehčené frézy CoroMill® 390 byla taktickým odstraněním materiálu vytvořena optimální konstrukce frézy a spolu s použitím titanové slitiny bylo dosaženo výrazného snížení hmotnosti. To má za následek omezení sklonů ke vzniku vibrací a zvýšení stability řezu. Díky tomu je tato fréza kompaktnější a výrazně lehčí než běžná fréza. Zkrácením vzdálenosti mezi tlumícím mechanismem a břitem přispívá ke zvýšení pevnosti konstrukce a zlepšení bezpečnosti obráběcího procesu. [18]

Obráběný materiál	P2.5.Z.HT, tvrdost 290HB	
Operace	Čelní frézování s velkými radiálními šífkami řezu (80–100 % průměru frézy)	
Stroj	OKUMA MA550-VB	
Adaptér	C5-Q22D-048-220	
	Konvenční fréza CoroMill® 390	Odlehčená fréza CoroMill® 390
Nástrojový materiál	Ocel	Titanová slitina
Průměr nástroje, mm	50	50
Hmotnost, g (oz)	317 (11.2)	66 (2.33)
Britové destičky	R390-11T308M-PM 1130	R390-11T308M-PM 1130
z_n	3	3
n ot/min	1273	1273
v_c m/min (ft/min)	200 (656)	200 (656)
w mm/min (in/min)	573 (22.6)	573 (22.6)
f_z mm/z (in/z)	0.15 (0.006)	0.15 (0.006)
a_p mm (inch)	1.5 (0.059)	4.5 (0.177)
a_w mm (inch)	50 (1.97)	50 (1.97)
MRR cm^3/min (in^3/min)	43 (2.62)	129 (7.87)
Výsledek: Zvýšení produktivity o 200 %		

Tabulka 1: Porovnání konvenčně a aditivně vyráběné frézy CoroMill® 390 [18]

Fréza CoroMill® 390 je rovněž vybavena vnitřním přívodem řezné kapaliny na čelo břitových destiček. Tím je dosaženo optimálního chlazení při obrábění a zlepšenému odvodu třísek.[1]

Na následujících porovnáních v tabulkách 2 a 3 je vidět, jak se díky použití odlehčené frézy CoroMill® 390 mohla zvýšit hloubka řezu, rychlost otáček a posuvu při zachování stejné kvality výsledných ploch. To mělo za následek zkrácení doby v řezu, zvýšení životnosti nástroje a vyšší produktivitu. [18]

Obráběný materiál	P2.1.Z.AN	
Operace	Frézování drážek	
Nástroj	R390-012A12-07M	Stávající řešení
Britové destičky	390R-070204M-PM 1130	
v_c m/min (ft/min)	200 (656.166)	150 (492.125)
w mm/min (in/min)	900 (35.433)	600 (23.622)
h_{ec} mm (inch)	0.1 (0.004)	0.1 (0.004)
a_p mm (inch)	3 (1.118)	2 (0.079)
a_w mm (inch)	12 (0.472)	12 (0.472)
Výsledek		
Čas v řezu, min	3.76	5.5

Tabulka 2: Porovnání při použití stávajícího řešení a frézy CoroMill® 390 ve výrobní společnosti [18]

Součást	Formy a zápustky	
Obráběný materiál	P2.5.Z.HT	
Operace	Frézování drážek a dutin	
	GC1130	Stávající řešení
Nástroj	R390-012A12-07M	
Britové destičky	390R-070204M-PM 1130	
z_n	3	3
n ot/min	4005	3979
v_c m/min (ft/min)	151 (495)	150 (492)
w mm/min (in/min)	853 (33.583)	900 (35.433)
f_z mm (inch)	0.07 (0.003)	0.075 (0.003)
a_p mm (inch)	1.5 (0.059)	1 (0.039)
a_w mm (inch)	12 (0.472)	12 (0.472)
Výsledek		
Životnost nástroje	44 minut	30 minut

Tabulka 3: Porovnání při použití stávajícího řešení a frézy CoroMill® 390 ve výrobní společnosti [18]

2.5.2. Gühring plochá fréza PKD SMART CAP PF3000G



Obrázek 2-25: PKD fréza s aditivně vyráběným krytem (Smart Cap) [19]

Tato fréza je určena pro obrábění materiálů skupiny N, převážně pro hliník. Její část, konkrétně Smart Cap je vyráběna aditivní technologií. K vývoji této frézy vedla skutečnost, že je ve výrobě potřeba maximálně zefektivnit čas obrábění. U běžných PKD čelních fréz se mohou třísky nekontrolovaně dostávat do obrobku přes otevřené prostory pro třísky. S touto inteligentní geometrií nástroje čelní frézy s aditivně vyráběným krytem (Smart Cap) je možné dosáhnout definovaného odvodu třísek pro maximální spolehlivost procesu. Třísky jsou stoprocentně odkloněny od součásti. Tudiž není potřeba obrobek po obrábění od třísek oplachovat, či jinak manuálně čistit, což je obzvláště důležité například u součástí jako jsou hlava válce, kryt elektromotoru, nebo části převodovky. Při dodávce těchto komponentů výrazně klesá riziko zbytku nečistot jako jsou třísky a možnost předčasného selhání při následném provozu je tudiž nižší. Další výhodou výroby aditivní technologií je bezbariérový design, který umožňuje výrobu trojrozměrných chladících kanálků. Tímto způsobem lze také při MQL obrábění zaručit optimalizovanou regulaci teploty bříty PCD a spolehlivý odvod třísek. Výhodou je i to, že není nutné seřizování nástroje, protože „Smart Cap“ lze po skončení životnosti vyměnit na místě u uživatele. [19][20]



Obrázek 2-26: Smart Cap [21]

2.5.3. Komet Group Řada frézovacích nástrojů „Revolution“ PKD stopková fréza a šroubová fréza HPC



Obrázek 2-27: Produktová řada nástrojů Revolution [23]

Společnost Komet Group se zabývá 3D tiskem nástrojů od roku 2015. Pouhá možnost volně navrhovat geometrii nástroje uvnitř i vně dělá z generativních procesů téma budoucnosti. Protože s novými geometriemi, které nelze obrábět, lze enormně zvýšit výkon a produktivitu nástrojů. Při 3D tisku svých nástrojů spoléhá Komet na proces „selektivního tavení laserem“ v ochranné atmosféře argonu. Za tímto účelem se v extrémně tenkém loži kovového prášku, obvykle se volí tloušťka vrstvy mezi 20 a 60 μm , roztaví dané oblasti pomocí vysoce výkonného ytterbiového vláknového laseru. Takto vyrobené obrobky mají strukturu, která je z 99,9 procent identická se strukturou válcovaných nebo litých kovových dílů. Prvním projektem připraveným pro trh byl vývoj nové šroubovací PKD frézy Komet JEL, jejíž aditivně generované základní tělo je opatřeno PKD břity a našroubováno na držák nástroje. Aditivní proces umožnil pojmout výrazně více PKD břitů na jednom nástroji změnou uspořádání břitů a výrazně většími úhly stříhu. Výsledkem je enormní nárůst produktivity. Například u 32 mm šroubovací hlavy se počet drážek a řezných hran zvýšil ze šesti na deset. Odpovídajícím způsobem nástroj umožňuje posuv zvýšený v tomto poměru. U takových fréz se využívá i aditivní výroba pro optimalizaci průběhu chladicích kanálů uvnitř nástroje. Zatímco lze obrábět pouze přímé kanály, průběh lze do značné míry libovolně volit aditivními procesy. Zakřivená kanálová vedení jsou nyní

umístěna přesně tak, aby každá řezná hrana byla optimálně zásobována samostatným chladicím kanálem. [23]



Obrázek 2-28: Šroubovací hlavy [23]

2.5.4. Gühring stopková fréza pro přesné obrábění kovů

Tento nástroj je vyroben pomocí 3D tisku metodou FFF na stroji Markforged Metal X, který používá polymerové vlákno, nesoucí kovový prášek jako způsob, jak vytvořit tvar součásti. Tento nástroj je tištěn z materiálu H13. Jde o nástrojovou ocel se složením viz tabulka 4. Po vytištění nástroje na Markforged Metal X se tento díl nazývá zeleným. Dalším krokem je odstranění polymeru nebo vosku z materiálu, který byl použit jako nosič. To se provádí pomocí procesu mytí a sušení. Po vysušení se díl označuje jako hnědý. Poté je díl vložen do sintrovacího stroje. V této chvíli je díl ještě o 20 % větší. Tímto procesem se součást smrští a má strukturu téměř shodnou s litými součástmi (obr.2-30) a správnou velikost. V následující operaci se brousí stopka na toleranci h6. Na takto hotovou součást se připevní řezné segmenty z PKD, které se upraví na požadovaný tvar a rozměr laserem. Tento nástroj je o 30% lehčí než stejný nástroj vyráběný konvenční technologií. Je to z důvodu trojúhelníkové výplňové struktury dosažené 3D tiskem. Velikým přínosem pro dosažení vyšších rychlostí obrábění je přesné umístění výstupů chladicích kanálků v blízkosti řezné hrany. Tím nedochází k nekontrolovanému nárůstu teplot, pokud je nástroj ponořen v řezu a venkovní chladicí trysky by nemohly směřovat proud chladicí kapaliny k místu řezu. [24]

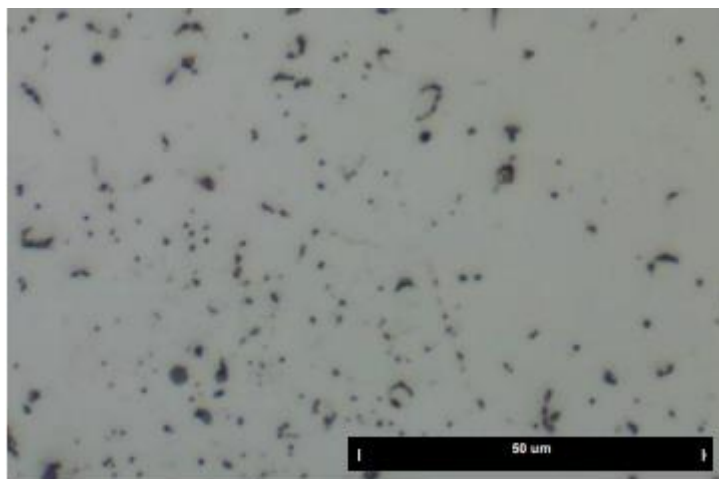


Obrázek 2-29: Stopková fréza od firmy Gühring vytištěná z materiálu H13 [25]

Nástrojová ocel H13

Složení	Množství
Chrom	4,7–5,5 %
Molybden	1,3–1,7 %
Křemík	0,8–1,2 %
Vanad	0,8–1,2 %
Uhlík	0,3–0,45 %
Mangan	0,2–0,5 %
Fosfor max.	0,03 %
Síra max.	0,03 %
Železo	Zbytek

Tabulka 4: Složení nástrojového materiálu pro tisku metodou FFF na stroji Markforged Metal X [26]



Obrázek 2-30: Struktura materiálu H13 [26]

2.6. Možné budoucí uplatnění 3D tisku

Diamant je tvrdší než jakýkoliv jiný materiál vyskytující se v přírodě. Je klíčovou součástí široké řady nástrojů odolných proti opotřebení v průmyslu, od těžby a vrtání až po obrábění a také lékařské implantáty. Od roku 1953 je možné vyrábět syntetický diamant, který je ale těžko a složitě obrobitelný, je tudíž téměř nemožné vytvořit složité tvary. Díky použití aditivní výroby a patentové metody následného zpracování, se společnosti Sandvik podařilo tisknout diamantové kompozity, které lze tvarovat do téměř jakéhokoli tvaru. Rozdíl mezi diamantem Sandvik a přírodním nebo syntetickým diamantem je ten, že Sandvik je kompozitní materiál. Většina materiálu je diamant, ale aby bylo možné tento materiál tisknout, musí být přidán do velmi tvrdého matricového materiálu, přičemž jsou zachovány nejdůležitější fyzikální vlastnosti čistého diamantu. Díky možné výrobě diamantového kompositu by nemusely být 3D tiskem vyráběny pouze nosiče řezných částí, ale kompletní řezné nástroje, téměř bez nutnosti dalšího obrábění. [42]

Další klíčovou výhodou aditivní výroby je to, že umožňuje minimalizovat plýtvání materiálem, čímž je technologie dlouhodobě udržitelnější než výroba substraktivním způsobem. Diamantový prášek v procesu společnosti Sandvik lze po tisku extrahovat z polymeru v suspenzi a poté jej recyklovat a znovu použít v jiné tiskové úloze.[42] Toto tvrzení platí pro všechny materiály aditivní výroby. Proto je aditivní výroba vhodná obzvláště pro drahé vstupní suroviny jako jsou vzácné kovy a drahé slitiny. Kromě výše uvedeného je velkým příslibem do budoucnosti výroba požadovaných výrobků v místě, kde jsou potřeba. Tím se odstraní neudržitelná logistika, přepravy velkých objemů výrobků po celém světě a nutnost držení velkých skladových zásob, které nebudou potřeba z důvodu rychlosti výroby pomocí 3D tisku. Jako příklad je možné uvést tisk náhradních dílů, které se budou tisknout v okamžiku skutečné potřeby a v místě skutečného použití.

Přes zdánlivě neomezené možnosti designu a navzdory technologii připravené pro sériovou výrobu má i aditivní výroba s kovovými materiály své limity. V tuto chvíli jsou stále překážkou náklady. Ceny prášku a procesů jsou dražší než u konvenčních technologií. Přesnost je navíc omezená. Nástroje společnosti Mapal se vyznačují mimo jiné svou přesností v řádu tisícin. Proto musí být všechny aditivně vyráběné nástroje ještě obráběny. Navíc by se neměl podceňovat ani lidský faktor a jeho kvalifikace. Vzdělávání konstruktérů je i dnes jednoznačně zaměřeno na konvenční výrobu. Návrh nástrojů, které jsou vyráběny ve 3D tiskárně, však vyžaduje přehodnocení a rozvoj příslušných dovedností. [45]

I přes to, že aditivní výroba umožňuje návrh a výrobu tvarově rozmanitých výrobků, drží se dnešní designéři a inženýři zpět v používání aditivní výroby v její plné geometrické schopnosti. Jednoduše proto, že spotřebitelé a uživatelé 3D tištěných předmětů musí mít pocit důvěry a uznání těchto předmětů. Jak si lidé stále více zvykají na generativně navržené formy výrobků, budou se dveře otevírat stále složitějším, asymetrickým a optimalizovaným objektům, ať už to budou držáky pro letectví, součásti automobilových motorů nebo spotřební produkty. [25]

3. Návrh vlastního řešení a jeho realizace

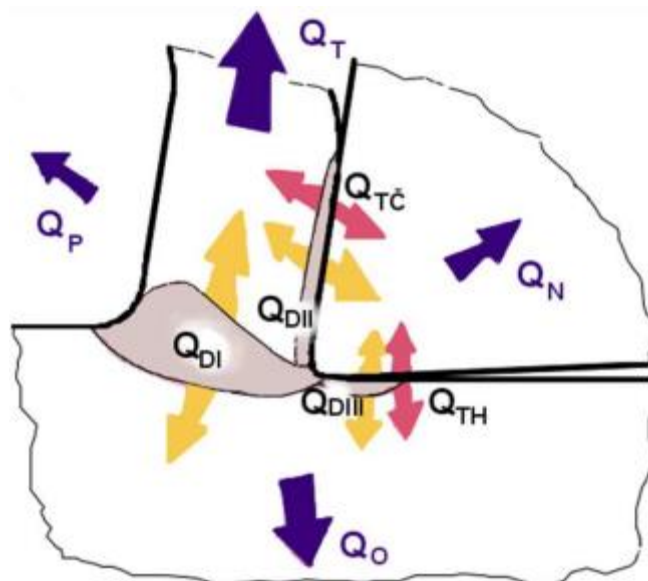
3.1. Informace potřebné k návrhu

V této kapitole jsou zmíněné teoretické poznatky, ze kterých bylo později vycházeno k návrhu a následnému zpracování praktického řešení optimalizace frézovací hlavy.

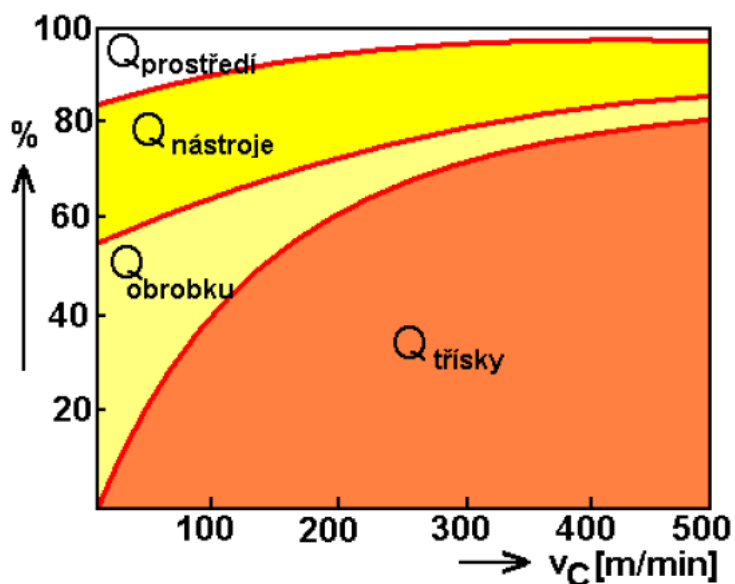
3.1.1. Teplo při obrábění

Při třískovém obrábění se až 99 % energie mění v teplo. To má vliv na přesnost a povrchové vlastnosti obrobku a vlastnosti a dobu použitelnosti nástroje. Teplo, které vzniká při obrábění, je odváděno do třísky, nástroje, okolního prostředí a obrobku.

Teplo, které vzniká, ovlivňuje řezný proces, protože negativně působí na řezné vlastnosti nástroje, ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu, ovlivňuje pěchování a zpeňování obráběného materiálu a ovlivňuje podmínky tření na čele a hřbetě nástroje.[50]



Obrázek 3-1: Šíření tepla v nástroji, obrobku a tříске [49]



Obrázek 3-2: Znázornění rozdělení tepla při změně rychlosti [50]

Platí tepelná bilance procesu obrábění

teplo vzniklé=teplo odvedené

$$Q_{DI} + Q_{DII} + Q_{DIII} + Q_{TC} + Q_{TH} = Q_T + Q_O + Q_N + Q_P$$

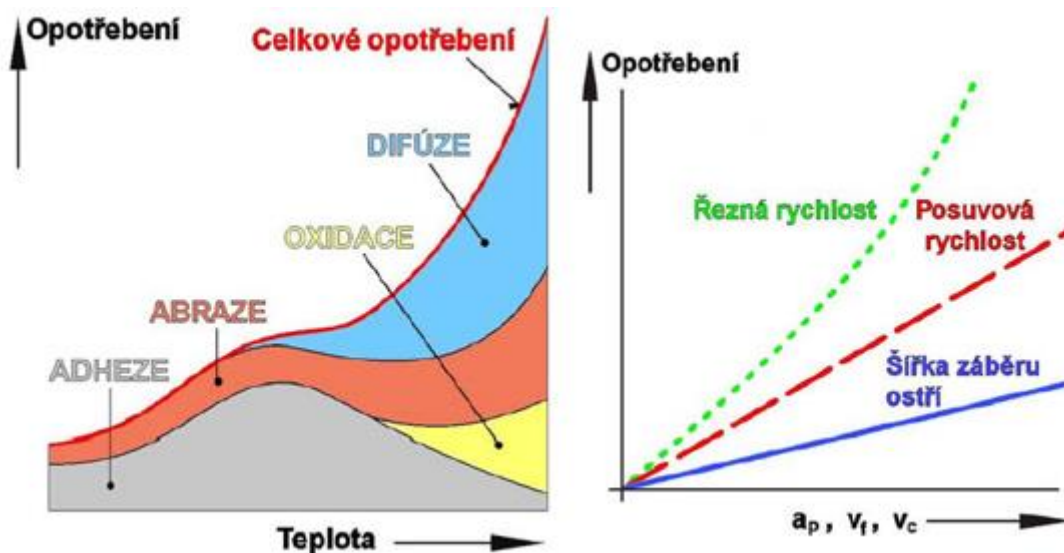
Q_{DI} ... teplo vzniklé v oblasti primárních plastických deformací	Q_T ... teplo odvedené třískou
Q_{DII} ... teplo vzniklé v oblasti sekundárních plastických deformací	Q_O ... teplo odvedené obrobkem
Q_{DIII} ... teplo vzniklé v oblasti terciálních plastických deformací	Q_N ... teplo odvedené nástrojem
Q_{TC} ... teplo vzniklé třením třísky na čele nástroje	Q_P ... teplo odvedené prostředím
Q_{TH} ... teplo vzniklé třením třísky na hřbetu nástroje	

Obrázek 3-3: Zkratky [49]

3.1.2. Vliv teploty na jednotlivé mechanismy opotřebení břitu nástroje

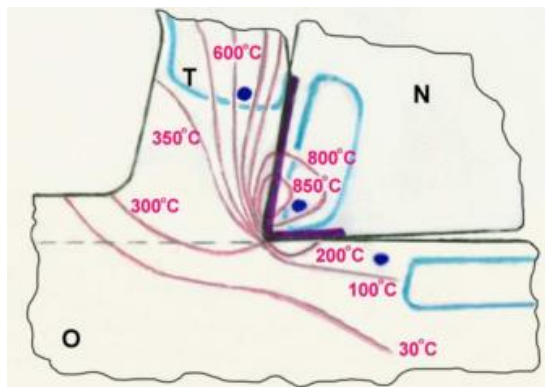
Dlouhodobá trvanlivost nástroje je dána vhodnou kombinací správné volby chlazení a správné volby řezných podmínek. Nedodržení správných řezných parametrů vede ke zkrácené životnosti nástrojů, a to se projevuje na snížené produktivitě obrábění.[50]

Následující dva obrázky 3-4 a 3-5 ukazují závislost opotřebení na teplotě a vliv řezných podmínek na opotřebení.



Obrázek 3-4: Závislost opotřebení na teplotě a na řezných podmínkách [50]

Největší vliv na opotřebení má řezná rychlost, při které stoupá teplota v místě řezu a tím se zvětšuje opotřebení. To lze částečně eliminovat použitím přívodu dostatečného množství chladící kapaliny na exponovaná místa. V závislosti na řezné rychlosti, vzdálenosti od zdroje tepla a na tepelné vodivosti materiálu dosahují teploty hodnot v rozsahu 300 až 1000 °C.



Obrázek 3-5: Teplotní pole obrobek, nástroj, tříška [49]

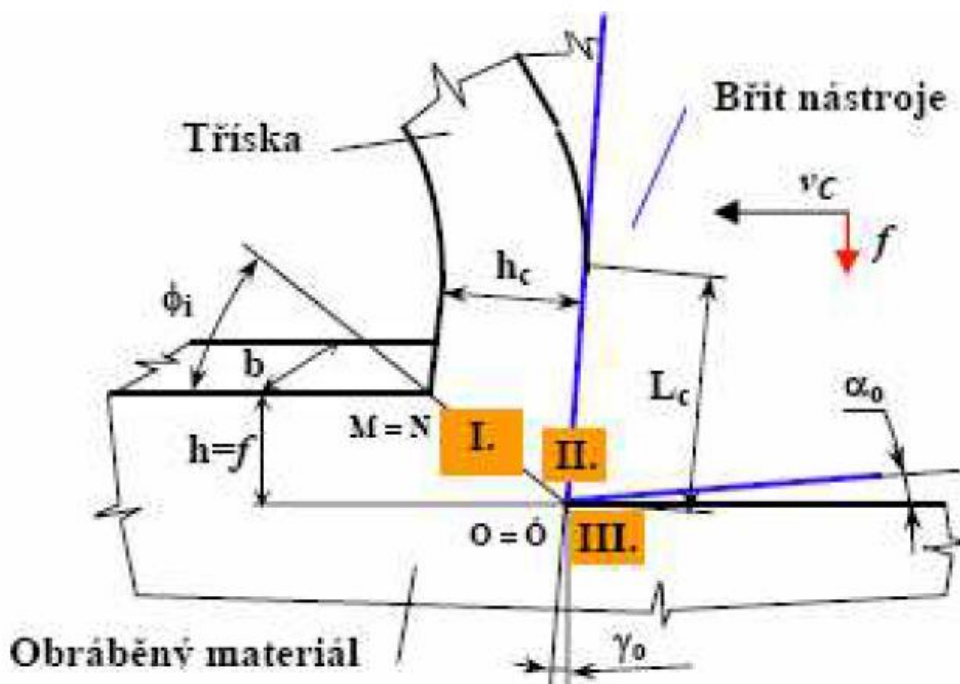
3.1.3. Plastické deformace

K vytvoření třísky jsou zapotřebí relativní pohyb a silový účinek břitu. To má za následek vznik deformací a třísky. Druhy deformací můžeme rozdělit na:

- pružné, které vznikají v celém obrobku, nástroji a obráběcím stroji,
- trvalé, nebo také plastické, které jsou žádoucí jen v obrobku v kořenu třísky a rozrušivé v obrobku těsně u ostří břitu.

Plastické deformace se podle místa vzniku dělí na primární, sekundární a terciální. Z hlediska opotřebení řezného nástroje nás zajímají sekundární a terciální plastická deformace, které způsobují na čele a hřbetu nástroje opotřebení. Jen pro úplnost je uvedena i primární plastická deformace.

- I. oblast primárních plastických deformací: rozhodující z hlediska tvorby třísky.
- II. oblast sekundárních plastických deformací: v důsledku vysokého tlaku, teploty a kovově čistých povrchů dochází k adhezi mezi materiálem třísky a nástroje.
- III. oblast terciálních plastických deformací: v důsledku zaoblení břitu nástroje je část materiálu stlačována pod ostří nástroje. Tím vznikají v obrobku zbytková povrchová napětí a třením se ohřívá hřbet nástroje. [50]



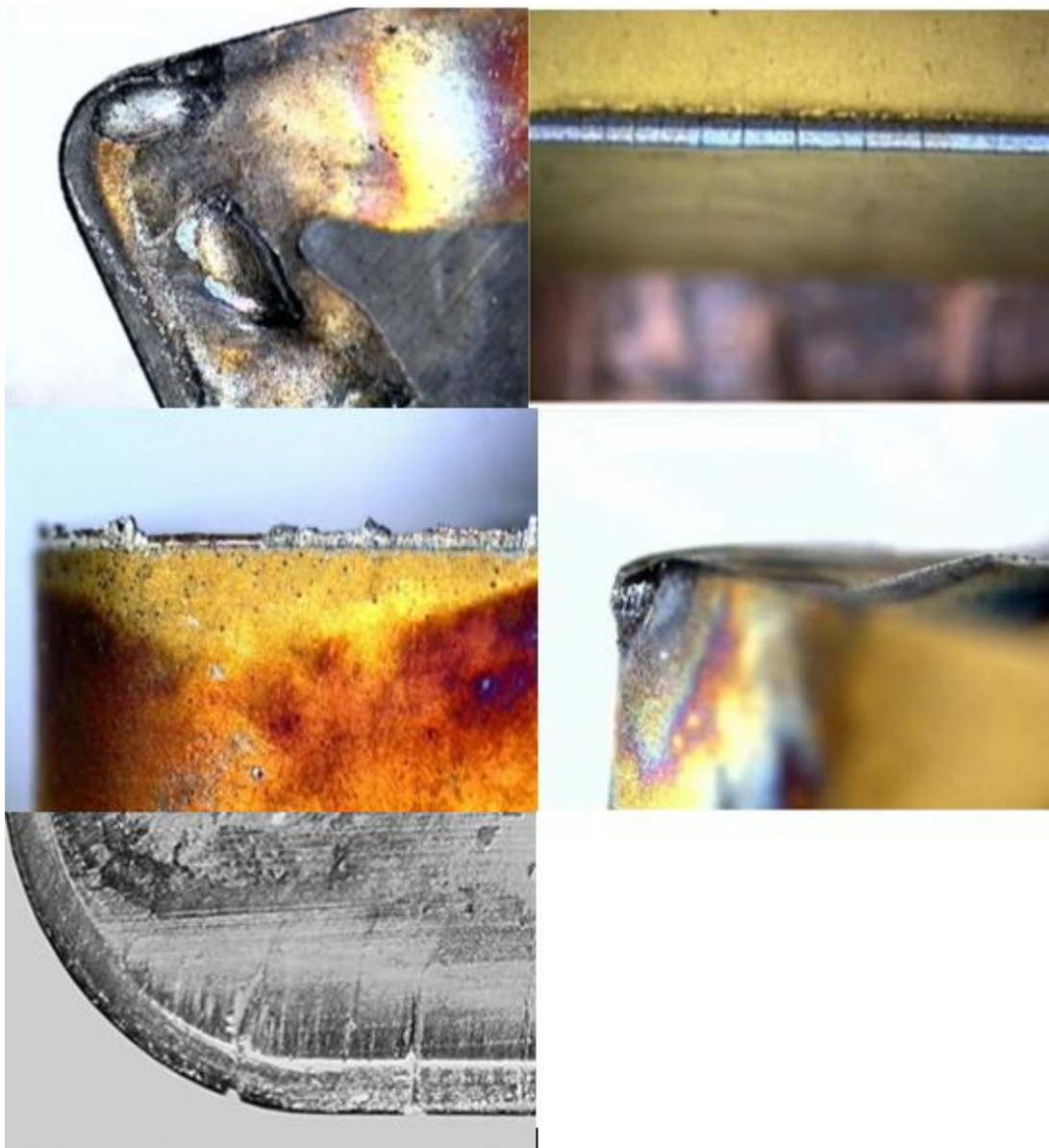
Obrázek 3-6: Oblasti plastických deformací [50]

Oblast terciálních plastických deformací může mít negativní vliv na nástroj jednak z důvodu zvýšeného tření na hřbetě, ale i při obrábění již jednou obrobeného povrchu. V závislosti na hloubce řezu přichází na různých místech břitu nástroje do styku se zpevněnou vrstvou z předchozího řezu.

3.1.4. Opotřebení řezných nástrojů způsobené zvýšenými teplotami

Pro názornost uvádím následující typy opotřebení, na které má vliv zvýšená teplota.

Vymílání, tvorba nárůstku, tepelně mechanické poškození, deformace hrany a hřbenová trhlinka. Všechna tato poškození řezných nástrojů vznikají v důsledku zvýšené teploty při obrábění, nebo k nim zvýšená teplota výrazně přispívá.



Obrázek 3-7: Opotřebení řezných nástrojů způsobené zvýšenými teplotami [46,47]

3.1.5. Důvody pro chlazení při obrábění

- Chlazení třísky
- Chlazení nástroje delší trvanlivost břitu
- Odvod třísky, lámavost třísky
- Snížení koeficientu tření
- Snížení tepelného pnutí obrobku

3.1.6. Požadavky na chladící kapalinu

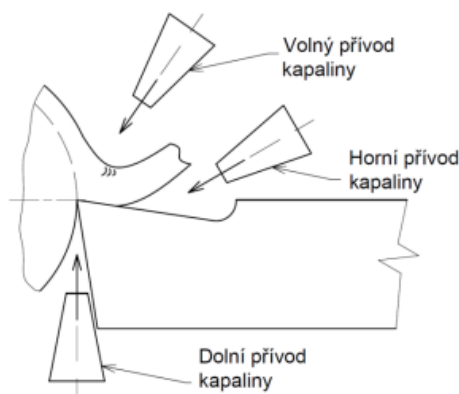
V dnešní době již nejsou dostačující jako jediné požadavky na řeznou kapalinu, aby měla dostatečné chladicí a řezné účinky. Důležitou roli zvyšujících se nároků na procesní kapaliny sehrávají i stále se zpřísnující zákonné požadavky a například i veřejné mínění, které má za následek zmenšující se potřebu používat nebezpečné látky.

Mezi hlavní požadavky na chladící kapalinu pro obrábění můžeme zařadit:

- chladicí účinek
- mazací účinek
- čistící účinek
- provozní stálost
- ochranný účinek
- zdravotní nezávadnost
- nízké náklady

3.1.7. Způsob přívodu procesní kapaliny do místa řezu

Z dřívějších dob běžný přívod řezné kapaliny se již na moderních obráběcích strojích téměř nepoužívá. Jedná se např. o stavitelné trysky, které mají větší výstupní průměr než trysky přesného přívodu řezné kapaliny. Během obrábění mají zajistit, aby řezná kapalina ve velkém množství proudila přes břitovou destičku a součást (může být označováno jako zaplavení místa řezu řeznou kapalinou). Oproti tomu moderní nástroje jsou na čelní straně břitu opatřené tryskami zajišťujícími přesný přívod řezné kapaliny přímo do místa řezu, což pomáhá kontrolovat dělení třísek, snižuje teplotu a zaručuje bezpečnost obrábění. Pro optimalizaci výkonu stroje, další zvýšení životnosti nástrojů a zlepšení utváření třísek lze využít jemné nastavení dodávaného množství a rychlosti průtoku řezné kapaliny prostřednictvím změny průměru trysky. Příznivý účinek přesného přívodu řezné kapaliny je patrný už při nízkých tlacích řezné kapaliny, ale čím vyšší její tlak je, tím je možné úspěšně obrábět problematictější materiály.



Obrázek 3-8: Varianty přívodu procesní kapaliny příklad u soustružení [56]



Obrázek 3-9: Přívod procesní kapaliny – zaplavení, přesný přívod [51]

Výstup procesní kapaliny je v zásadě možný přes stavitelné trysky, nebo otvory v nástroji.

3.1.8. Směřování přívodu procesní kapaliny

Přívod řezné kapaliny je v zásadě možný z horní strany na čelo a ze spodní strany na hřbet nástroje. Nejúčinnější je kombinovaný přívod kapaliny, který jednak prodlužuje životnost nástroje, ale i pomáhá utvářet a kontrolovat odchod třísky z řezu. Jak uvádí následující rozdělení v tabulce 5, výhoda přívodu řezné kapaliny na hřbet nástroje je pro každý druh obráběného materiálu a každý druh nástrojového materiálu stejná. Zajišťuje delší životnost nástroje. Pro přívod kapaliny na čelo nástroje může být pro různé materiály rozdílná.

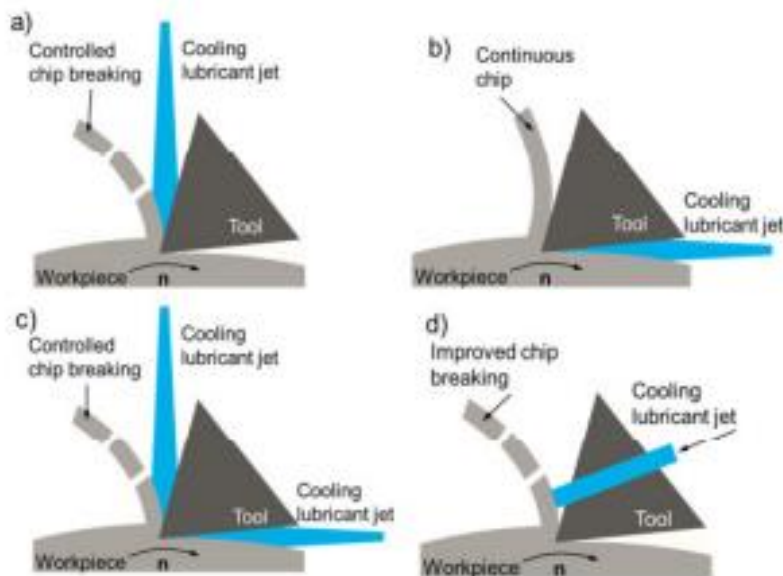
Obráběný materiál	Typ nástrojové třídy	Přívod řezné kapaliny	Přívod řezné kapaliny
		shora	zdola
P	CVD	Kontrola utváření třísek	
	PVD	Kontrola třísky / Životnost	
M	CVD	Kontrola utváření třísek	
	PVD	Kontrola třísky / Životnost	
K	CVD	Životnost nástroje	
	Keramika	Životnost nástroje	Životnost nástroje
N	Nepovlakovaná	Kontrola třísky / Životnost	
	PVD	Kontrola třísky / Životnost	
	PCD (diamant)	Kontrola třísky / Životnost	
S	PVD	Kontrola třísky / Životnost	
	Keramika	Kontrola utváření třísek	

Tabulka 5: Přínosy přívodu procesní kapaliny na čelo a hřbet nástroje [51]

Při použití přívodu procesní kapaliny je zvýšena bezpečnost obráběcího procesu a zároveň maximalizována jeho efektivita. Při přívodu procesní kapaliny z horní strany je zajištěno kontrolované utváření třísek, což má vliv na bezpečnost a životnost nástroje. Při použití spodního přívodu je zajištěna lepší kontrola teploty, to má přínos v prodloužení životnosti nástroje. Nezanedbatelným přínosem přesného přívodu procesní kapaliny je i vliv na kvalitu obrobeného povrchu. [52]

Aby byl zajištěn nejlepší možný výsledek při odvádění třísek je nutné přesně nasměřovat proud procesní kapaliny. Přesnost přívodu procesní kapaliny a její tlak jsou však téměř stejně důležité parametry. Pokud je přívod procesní kapaliny přesně nasměřován, může být použit nižší tlak procesní kapaliny. V případě použití vyššího tlaku je možné dosahovat vynikající výsledky i při obrábění při vyšších rychlostech, nebo hůře obrobitelných materiálů.[53]

Na obrázku 3-10 je znázorněn přívod chladicí kapaliny. Horní, dolní a kombinovaný. Na obrázku d) je přívod kapaliny skrz nástroj s vyústěním na čele pro lepší lámavost třísky, který se používá u těžce obrobitelných materiálů jako je například titan.



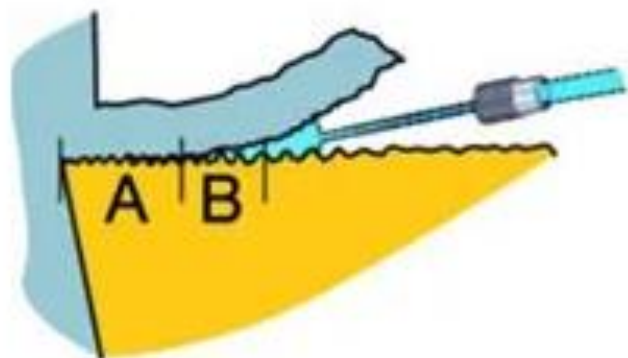
Obrázek 3-10: Druhy přívodu procesní kapaliny [54]

3.1.9. Tlak řezné kapaliny

Díky využití vyššího tlaku při obrábění je možné zvýšit produktivitu, ale musíme myslet také na to, že při použití vysokého tlaku rostou náklady na energie a tím se zvyšují celkové náklady na obráběcí proces. Řezná kapalina, která je přesně a o vysokém tlaku přivedena do místa řezu, tvoří proud, v jehož důsledku se vytváří hydraulický klín.

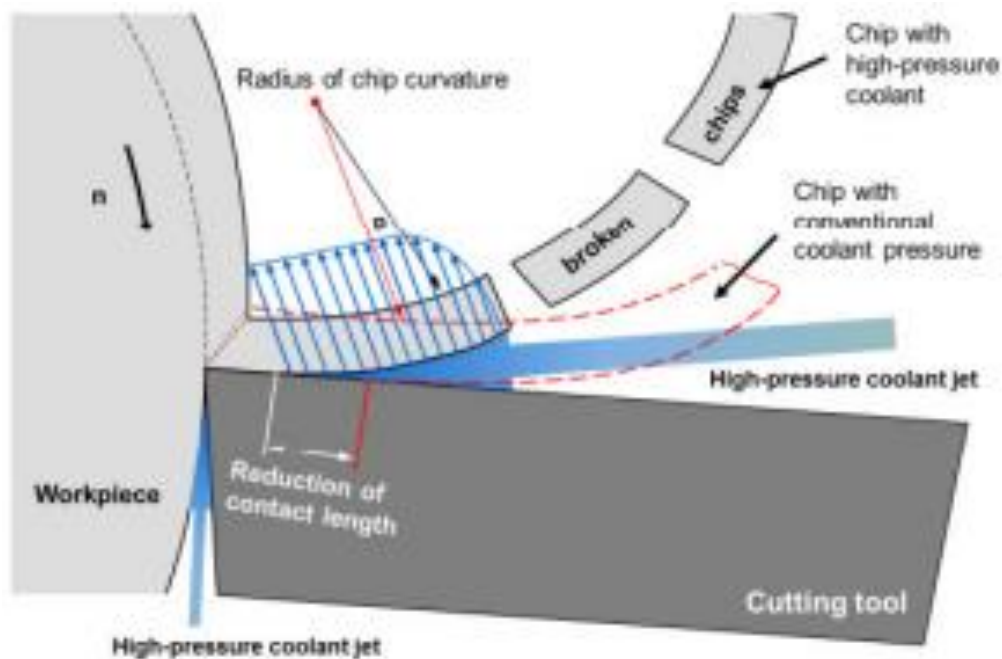
Existují tři hlavní účinky proudu řezné kapaliny:

- V oblasti kontaktu s obráběným materiálem je VBD účinněji chlazena.
- Odtlačování třísky od čela VBD, díky čemuž je sníženo opotřebení (oblast B obrázek 3-11)
- Lepší dělení třísek a jejich snadnější odplavení z místa řezu.[51]



Obrázek 3-11: Hydraulický klín a jeho přínos [51]

Vysoký tlak řezné kapaliny snižuje poloměr zakřivení třísky a třísky se lámou na malé kusy, které lze snadno odstranit. Dále se zmenšuje délka kontaktu mezi nástrojem a třískou, což má za následek nižší tření, nižší řezné síly a nižší tepelné zatížení nástroje.



Obrázek 3-12: Znárodnění dělení třísky a kratší styková plocha při vysokotlakém chlazení [54]

Při volbě tlaku řezné kapaliny je možné řídit se podle následujícího doporučení výrobce nástrojů Sandvik:

- 7–10 barů (100-150 psi)

Aby bylo možné zvýšit hodnoty řezných parametrů při zachování bezpečnosti obrábění, je žádoucí přesný přívod procesní kapaliny. To zaručuje lepší kontrolu utváření třísky spolu se spolehlivostí a provozní bezpečností při obrábění ocelí a jiných běžně obráběných materiálů.

- 70–80 barů (1000-1200 psi)

Pro lepší dělení třísek, kromě vyššího tlaku, dopomáhají VBD, které jsou speciálně upravené pro přívod chladicí kapaliny, čímž ještě zlepšují dosažené výsledky.

- 150–200 barů (2200–2900 psi)

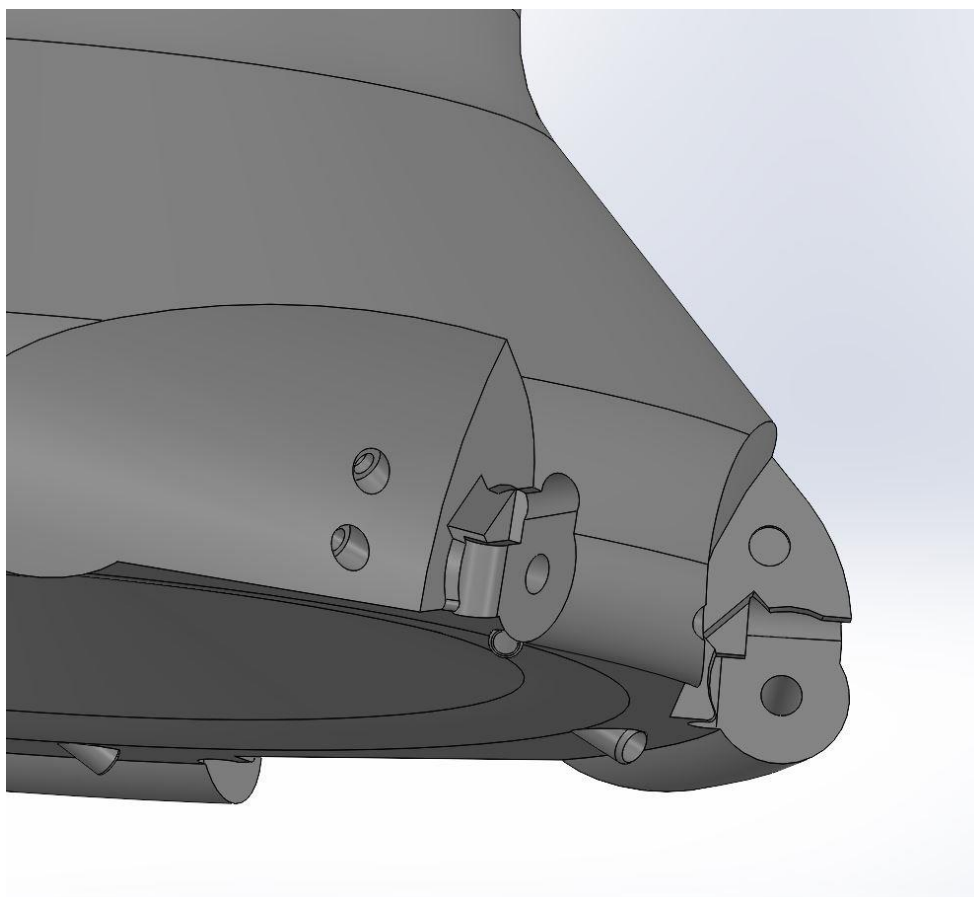
K obrobení duplexních korozivzdorných ocelí a stejně tak žárovzdorných materiálů, které je možné označit jako problematické pro obrábění, je žádoucí použití vyšších tlaků a zároveň využití nástrojových držáků, které jsou vybavené tryskami pro přesný přívod procesní kapaliny. V těchto případech se používají i nástroje se speciálně upravenou geometrií. [51]

3.2. Návrh vlastního řešení

S rozvojem aditivních technologií se stále více začínají uplatňovat návrhy řešení, které by bez těchto technologií nebylo možno realizovat. Díky svobodě návrhu, kterou umožňuje výroba 3D tiskem bylo možné vytvořit libovolné směřování chladicí kapaliny na předem vytipovaná místa, na kterých dochází k největšímu tepelnému zatížení během obrábění. Díky této optimalizaci by nemělo docházet k rychlému opotřebení vyměnitelných břitových destiček (VBD).

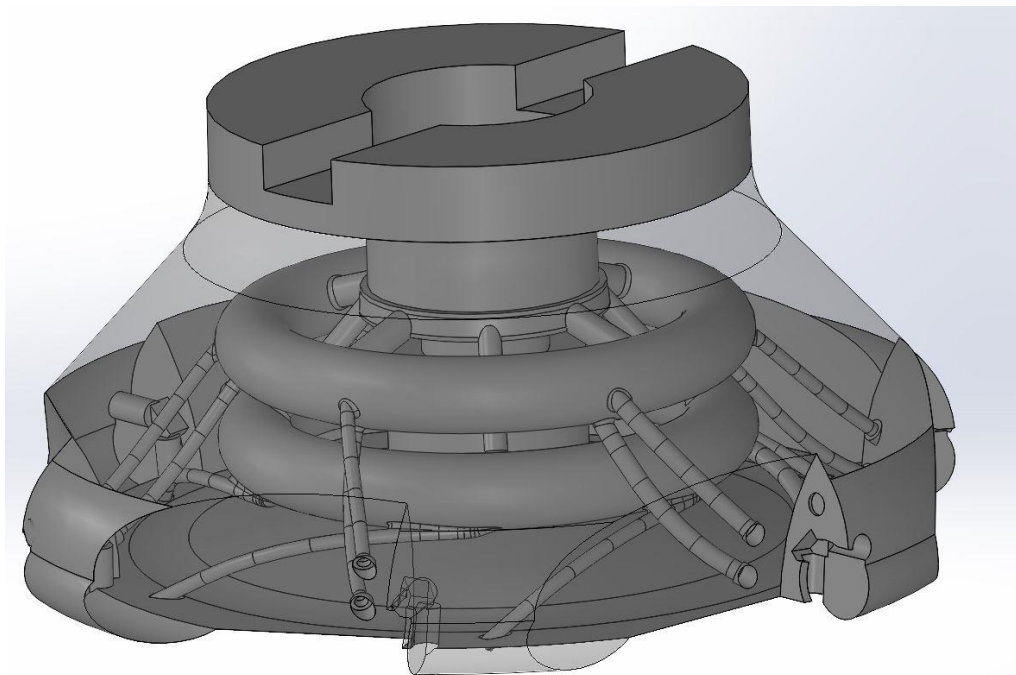
Na základě poznatků, které jsou uvedené v předchozí kapitole, bylo vypracováno vlastní řešení, které odpovídá požadavkům na prodloužení životnosti obráběcích nástrojů. Bylo to zejména určení tepelně nejexponovanějších míst během obrábění a analýza přívodu a účinku procesní kapaliny. Zvláště důležité bylo přesné směřování do míst styku nástroje a třísky, potažmo obrobene plochy v terciální oblasti.

Pro optimalizaci frézovací hlavy bylo rozhodnuto a přívodu procesní kapaliny na čelo a hřbet VBD. Z důvodu většího tepelného namáhání na čele, bylo použito dvou trysek směřujících na tuto oblast, což je vidět na následujícím obrázku 3-13.



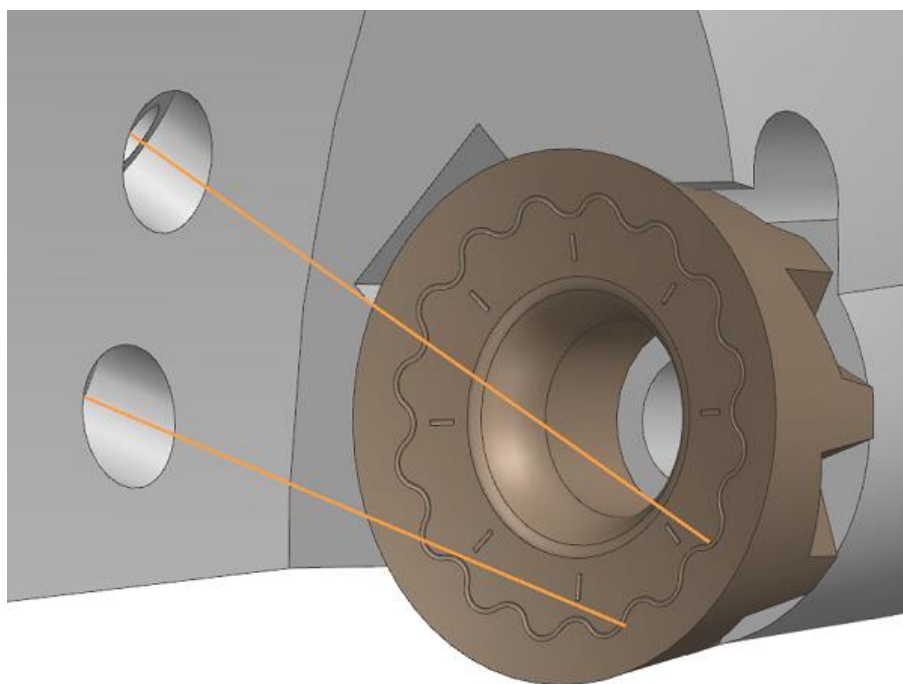
Obrázek 3-13: Vyústění kanálků [vlastní zpracování]

Náhled do vnitřní struktury nástroje, kde jsou vidět kanálky pro přívod chladicí kapaliny poskytuje obrázek 3-14.



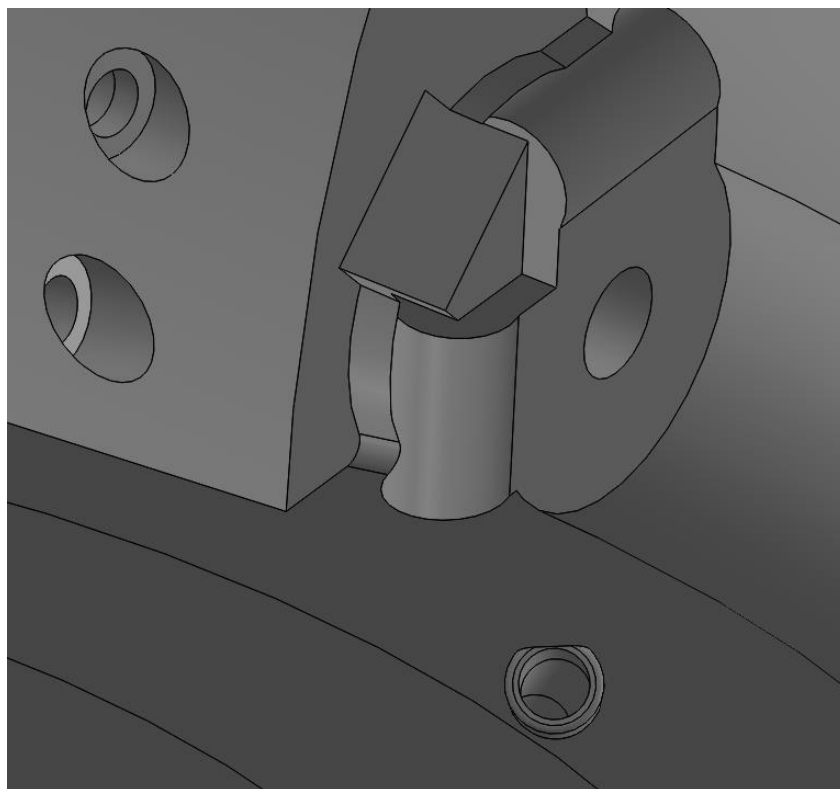
Obrázek 3-14: Náhled do vnitřního uspořádání kanálků pro přívod procesní kapaliny [vlastní zpracování]

Kanálky směřující na čelo nástroje jsou modelované tak, aby proud, který z nich bude vycházet, směřoval přímo do místa styku mezi VBD a třískou a vytvářel hydraulický klín. Tím by mělo být zajištěno dostatečné chlazení, kratší styk třísky s čelem VBD a lepší dělení třísky. Směrování proudnic je naznačeno na obrázku č. 3-15.



Obrázek 3-15: Proudnice [vlastní zpracování]

Oproti tomu je na hřbet destičky přivedena kapalina pouze jednou tryskou. Je to z důvodu nižšího tepelného zatížení než na čele VBD.



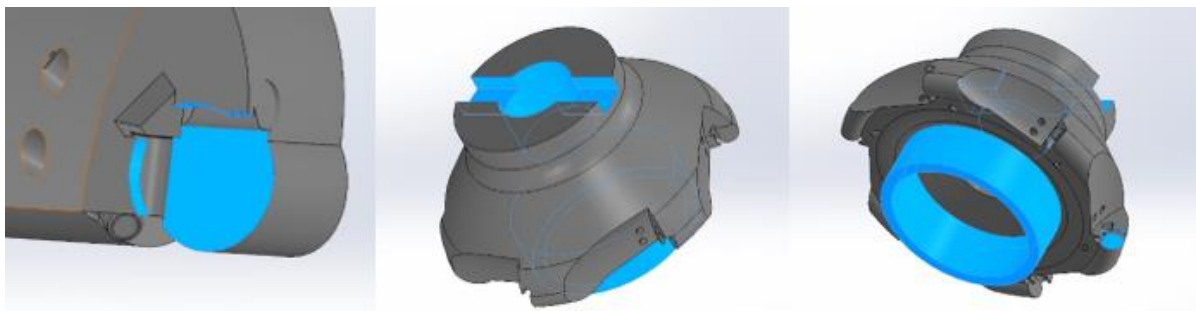
Obrázek 3-16: Tryska pro chlazení hřbetu VBD [vlastní zpracování]

Díky výhodě 3D tisku, kdy nemusí být na každém VBD stejný typ chlazení, byl pro zjištění vlivu množství procesní kapaliny přivedené do místa řezu u jedné VBD zvětšen průměr trysek tak, aby bylo zajištěno dvojnásobné množství přiváděné kapaliny. Je to z důvodu posouzení vlivu množství procesní kapaliny v místě řezu.

3.3. Výroba

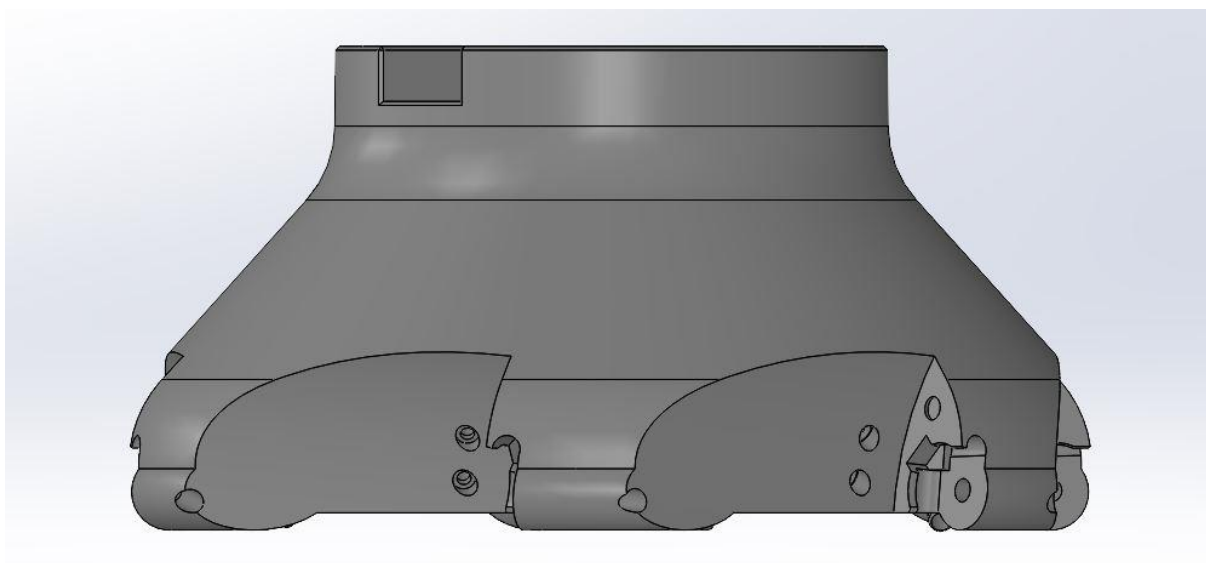
3.3.1. Vytvoření modelu pro výrobu

První částí procesu bylo navrhnutí modelu, který bylo potřeba nakreslit jako finální výrobek, tak i pro fázi 3D tisku. Tyto dva modely se od sebe liší o přídavky na funkčních částech, které je nutné ještě obrobit. Jedná se o drážku pro unášecí kámen, díru pro upínací trn a ustavovací plochy pro břitové destičky. Model pro tisk je ještě vybaven na spodní straně částí podobné kousku trubky pro následné upnutí do sklíčidla při obrábění. Tato část je po obrobení díry pro unášecí trn a drážky odstraněna. Na následujícím obrázku 3-17 jsou zvýrazněny plochy s přídavky pro 3D tisk.



Obrázek 3-17: Plochy s přídavkem pro obrábění [vlastní zpracování]

Model pro obrábění, který znázorňuje již hotový výrobek je na obrázku č.3-18.



Obrázek 3-18: Model obrobené frézy [vlastní zpracování]


3.3.2. Zařízení pro tisk

Pro tisk frézovací hlavy bylo použito zařízení od firmy EOS typ M 290. Jedná se o 3D tiskárnu s technologií Direct Metal Laser Sintering se 400 wattovým vláknovým laserem. Parametry a vlastnosti této tiskárny jsou uvedené v tabulce 6.



Obrázek 3-19: 3D tiskárna EOS M290 [vlastní zpracování]

Technická data EOS M 290

 Stáhnout Informační list | pdf | 385,4 kB

Stavební objem	250 x 250 x 325 mm (9,85 x 9,85 x 12,8 palce) (výška včetně montážní desky)
Typ laseru	Yb-vláknový laser; 400 W
Přesná optika	čočka F-theta; vysokorychlostní skener
Rychlost skenování	až 7,0 m/s (23 stop/s)
Průměr ohniska	100 μm (0,004 palce)
Zdroj napájení	32 A / 400 V
Spotřeba energie	max. 8,5 kW/ průměr 2,4 kW/s platformovým ohřevem až 3,2 kW
přívod stlačeného vzduchu	7 000 hPa; 20 m ³ /h (102 psi; 706 ft ³ /h)
Rozměry stroje (Š x H x V)	2 500 x 1 300 x 2 190 mm (98,4 x 51,2 x 86,2 palce)
Doporučený instalační prostor	min. 4 800 x 3 600 x 2 900 mm (189 x 142 x 114 palců)
Hmotnost	Cca. 1 250 kg (2 756 lb)
Software	EOSPRINT vč. EOS ParameterEditor, EOSTATE Everywhere, EOSCONNECT Core, EOSCONNECT MachinePark, Materialise Magics Metal Package a moduly

Tabulka 6: Technická data 3D tiskárny EOS M290 [58]

3.3.3. Postprocessing

Po očištění součásti a odstranění zbytkového prášku z vnitřních dutin bylo nutné provést tepelné zpracování, aby bylo odstraněno zbytkové pnutí, které zůstalo v součásti po 3D tisku. Z kapacitních důvodů však toto tepelné zpracování nebylo provedeno. Tato skutečnost měla zásadní vliv na celkovou funkčnost. Vlivem tepelného pnutí došlo k mírnému zkroucení výtisku, což vedlo i přes dostatečné přídavky na obráběcích plochách k tomu, že nebyly obrobene dosedací plochy podle modelu. Obrázek č 3-20. ukazuje frézovací hlavu po očištění a tepelném zpracování.



Obrázek 3-20: Fréza po 3D tisku [vlastní zpracování]

3.3.4. Obrábění funkčních ploch

Pro dokončení nástroje bylo potřeba obrobít upínací plochy a odstranit ostatní přebytečný materiál, který se na finální tvar napekl při výrobě. Nejdřív byla frézovací hlava upnuta za přidání prstýnek ve spodní části a byla obrobena upínací díra pro trn a drážka pro unášecí kameny. Následně byla hlava upnuta za tuto na čisto obrobenou upínací díru a byl odstraněn pomocný prstýnek a obrobena upínací plochy pro VBD. V poslední části byl odstraněn napečený materiál ze spodní strany frézy a očištěny výstupní trysky procesní kapaliny. Již hotový nástroj po obrobění je na následujícím obrázku 3-21.



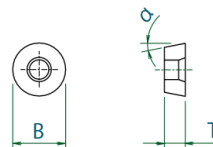
Obrázek 3-21: Fréza po obrobení funkčních ploch [vlastní zpracování]

3.3.5. Příprava obrábění

Po upevnění frézy na obráběcí trn byly na lůžka připevněny břitové destičky. Jednalo se o typ RPHT1204M8EN-SM; XC5040 určený pro obrábění materiálu Inconel 718.

Material Class	Grade	Coating Method	Hardness (HRA)	Surface Treatment		Features
				Main Component	Coating Thickness	
P	XC3030	CVD	89.5	TiCN + Al ₂ O ₃	10 μm	For Machining Steel and Cast Iron Composed of a tough, high-strength carbide material with a chipping-resistant and wear-resistant coating.
M	XP2025	PVD	91.0	TiAlN	5 μm	For Machining Stainless Steel and Steel Composed of a tough, high-strength carbide material with an anti-chipping and wear resistant coating.
S	XC5040	CVD	89.3	TiN + TiB ₂	4 μm	For Machining Heat-Resistant Alloy and Stainless Steel Can be used for wet machining. Composed of a tough carbide material with an oxidation-resistant and high-lubricity coating.

Tabulka 7: Typy destiček pro obrábění [59]



Designation	No. of Cutting Edges	Insert Size			EDP Number								
		B (mm)	T (mm)	α	CK010	XC3030	XP3035	XP2025	XP2040	XC1015	XC5035	XC5040	XP6015
RPHW1204MOSN	8	12	4.76	11°	-	7825018	7814018	-	-	7812018	-	-	-

Tabulka 8: Rozměry zvolené VBD [59]

Poté byl nástroj zaměřen. Při měření nástroje byly zjištěny rozdíly v radiálních i axiálních vzdálenostech VBD. Největší odchylky vykazovalo lůžko, které bylo pro porovnání účinků chlazení osazeno většími výstupy chladicí kapaliny viz tabulka 9. I přes tato zjištění bylo rozhodnuto, že test proběhne a nástroj byl upnut do obráběcího stroje DMU 40eVo linear výrobce DMG MORI obrázek č.3-22.

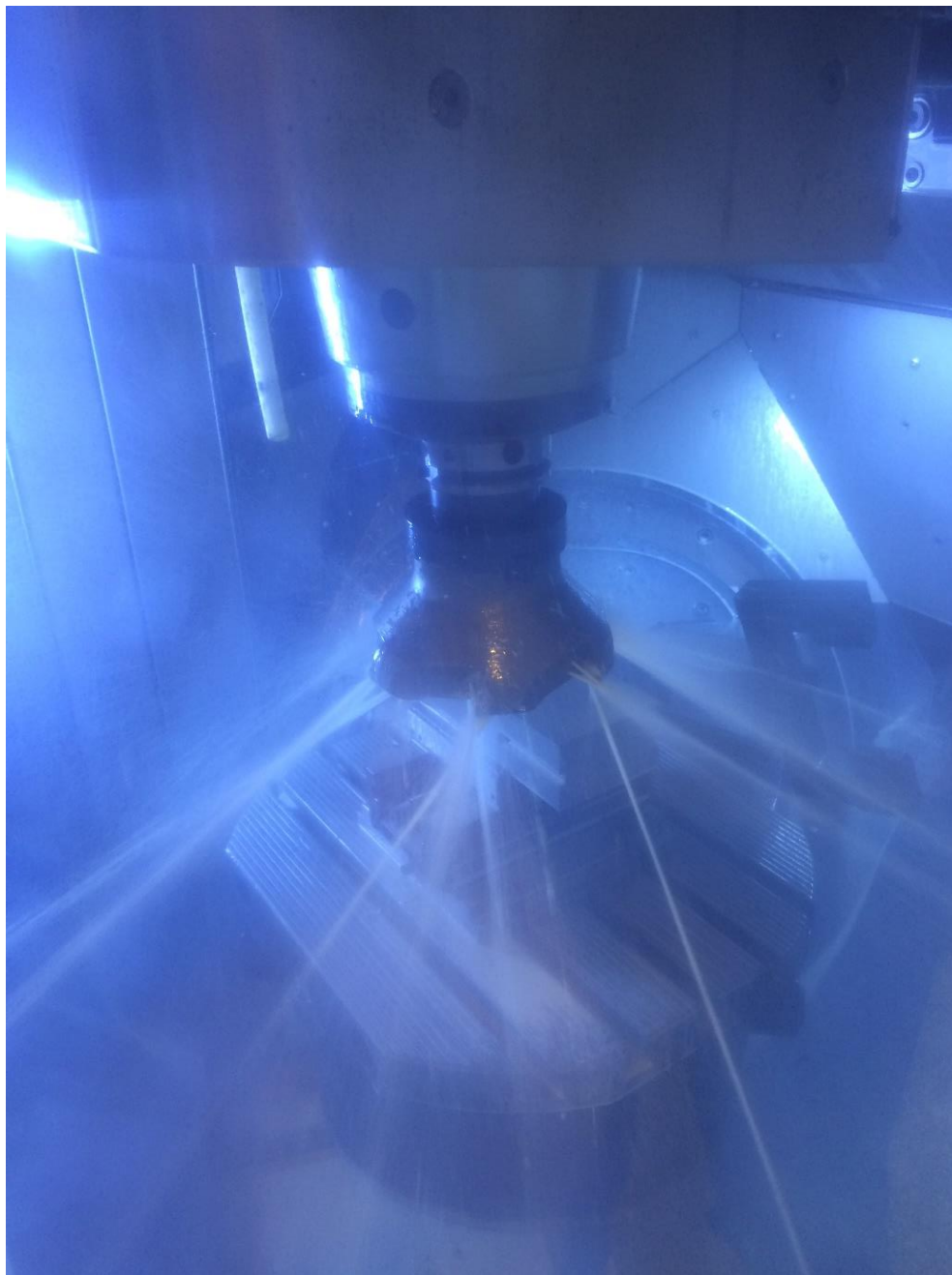
Stupeň	Výsledek	Mod.	Požad.hodn.	H. tol.	Skut.hodn.	vzd.hodn.	Tolerance
1	Největší poloměr	RA	64,900		64,924	0,024	
1	Poloměr - břit 1	RA	64,900		64,852	-0,048	
1	Poloměr - břit 2	RA	64,900		64,894	-0,006	
1	Poloměr - břit 3	RA	64,900		64,904	0,004	
1	Poloměr - břit 4	RA	64,900		64,924	0,024	
1	Poloměr - břit 5	RA	64,900		64,922	0,022	
1	Poloměr - břit 6	RA	64,900		64,898	-0,002	
1	Obvodové házení		0,000		0,072	0,072	
2	Nejvyšší ax. pozice	RA	121,956		122,140	0,184	
2	Axiální pozice - břit 1	RA	121,956		121,996	0,040	
2	Axiální pozice - břit 2	RA	121,956		122,140	0,184	
2	Axiální pozice - břit 3	RA	121,956		122,118	0,162	
2	Axiální pozice - břit 4	RA	121,956		122,133	0,177	
2	Axiální pozice - břit 5	RA	121,956		122,135	0,179	
2	Axiální pozice - břit 6	RA	121,956		122,139	0,183	
2	Čelní házení		0,000		0,144	0,144	
3	Dělení - břit 1-2				60,52		
3	Dělení - břit 2-3				58,96		
3	Dělení - břit 3-4				60,51		
3	Dělení - břit 4-5				59,51		
3	Dělení - břit 5-6				60,96		

Tabulka 9: Hodnoty měření frézy software Zoller [vlastní zpracování]



Obrázek 3-22: Fréza připravená k obrábění [vlastní zpracování]

Po upnutí následovalo krátké ověření průchodnosti kanálků pro přívod procesní kapaliny, již s procesní kapalinou ze stroje.



Obrázek 3-23: Zkouška průchodnosti kanálků pro procesní kapalinu [vlastní zpracování]

Při testování průchodnosti byla zjištěna drobná netěsnost na dosedací ploše matice, která upevňuje nástroj ze spodní strany k upínacímu trnu. Únik nebyl nijak masivní, a po zhodnocení situace bylo zahájeno obrábění.

3.3.6. Průběh experimentu

Abychom mohli říct, jestli byla optimalizace úspěšná, byl naplánován experiment, pro zjištění vlastností frézovací hlavy. Jednalo se o frézování desky z materiálu Inconel 718 o rozměrech obráběné plochy 268 x 90 mm. Použity byly destičky OSG Phoenix typ RPHT1204M8EN-SM; XC5040. Hodnoty rezných parametrů byly nastaveny následovně.

Obráběný materiál Deska Inconel 718				
VBD OSG Phoenix typ RPHT1204M8EN-SM; XC5040				
Rozměry plochy 268 mm x 90 mm				
Řezné parametry	Řezná rychlost	v_c	60	m/min
	Posuv	f_z	0,15	mm
	Radiální šířka řezu	a_e	30	mm
	Axiální hloubka řezu	a_p	1	mm
	Limitní opotřebení	VB_{max}	0,3	mm

Tabulka 10: Řezné parametry [vlastní zpracování]

Z důvodu možnosti porovnání byly všechny hodnoty zvoleny stejně, jako v obdobných experimentech realizovaných RTI při ZČU v Plzni. To se týká rozměrů i obráběného materiálu.

Strategie obrábění desky byla následující. Jednalo se o sousledné obrábění, kdy se obrobil pruh široký 30 mm. Následně došlo k přeměření destiček na měřicím zařízení. Jako limitní opotřebení VB_{max} byla zvolena hodnota 0,3 mm. Měření bylo prováděno na dílenském mikroskopu Multicheck 500 PC.

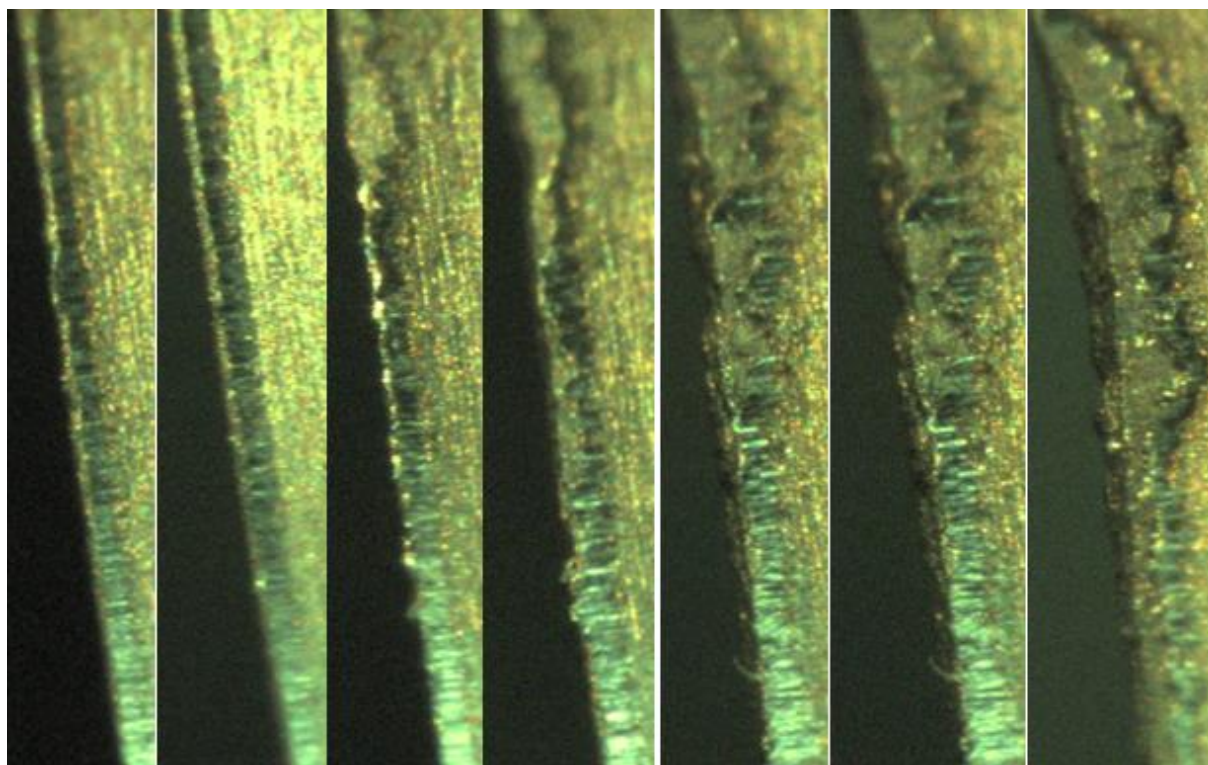
Jedná se o mikroskop, který je schopný měřit s přesností 0,005 mm, u kterého se dají automaticky měnit objektivy, což je velice uživatelsky přívětivé. Pro měření frézovací hlavy byl mikroskop vybaven prizmatickou podložkou, na kterou byla fréza i s trnem pokládána. Aby bylo možné správně změřit míru opotřebení, je mikroskop vybaven dvěma lampami a jednotkou pro nastavování intenzity světla. Propojení mikroskopu s počítačem nám pomocí software umožňuje měřit opotřebení nástroje. Fotky s tímto opotřebením je možné ukládat do paměti počítače.



Tabulka 11: Dílenský mikroskop Multicheck 500 PC [57]

Při obrábění měly být zaznamenávány hodnoty opotřebení hřbetu VB_B na dvou protilehlých břitových destičkách, z nichž jedna měla být destička s dvojnásobným přívodem procesní kapaliny. Bylo to plánováno z důvodu posouzení vlivu množství přívodu procesní kapaliny. Po obrobění prvního pruhu a následném měření se však zjistilo, že VBD upnutá v tomto lůžku není v záběru. Proto bylo rozhodnuto o měření jiných VBD.

Jak probíhalo postupné opotřebovávání VBD je vidět na následujícím obrázku 3-24.



Obrázek 3-24: Postupné opotřebovávání hřbetu VBD [vlastní zpracování]

Postupné opotřebování VBD VB_B je uvedeno v následující tabulce 13.

	Trvanlivost T [min]	Řez	VB_B 1 [μm]	VB_B 2 [μm]	VB_B 3 [μm]	VB_B 4 [μm]	VB_B 5 [μm]	VB_B 6 [μm]
Vrstva č.1	2,33	č.1	x	86	x	94	x	88
	4,66	č.2	x	94	x	101	x	97
	6,99	č.3	x	107	x	119	x	109
Vrstva č.2	9,32	č.4	x	124	x	124	x	129
	11,65	č.5	x	185	x	180	x	153
	13,98	č.6	x	250	x	240	x	237
Vrstva č.3	16,31	č.7	x	KO	x	KO	x	KO
	18,64	č.8	x	x	x	x	x	x
	20,97	č.9	x	x	x	x	x	x

Tabulka 12: Postupné otupování VB_B [vlastní zpracování]

Hodnoty z tabulky jsou zaznamenány ve dvou grafech. Pro přehlednost je v prvním grafu uvedena závislost opotřebení na počtu řezů a ve druhém grafu je uvedena trvanlivost VBD. Pro sestavení grafu bylo počítáno s průměrnou hodnotou opotřebení břitové destičky.

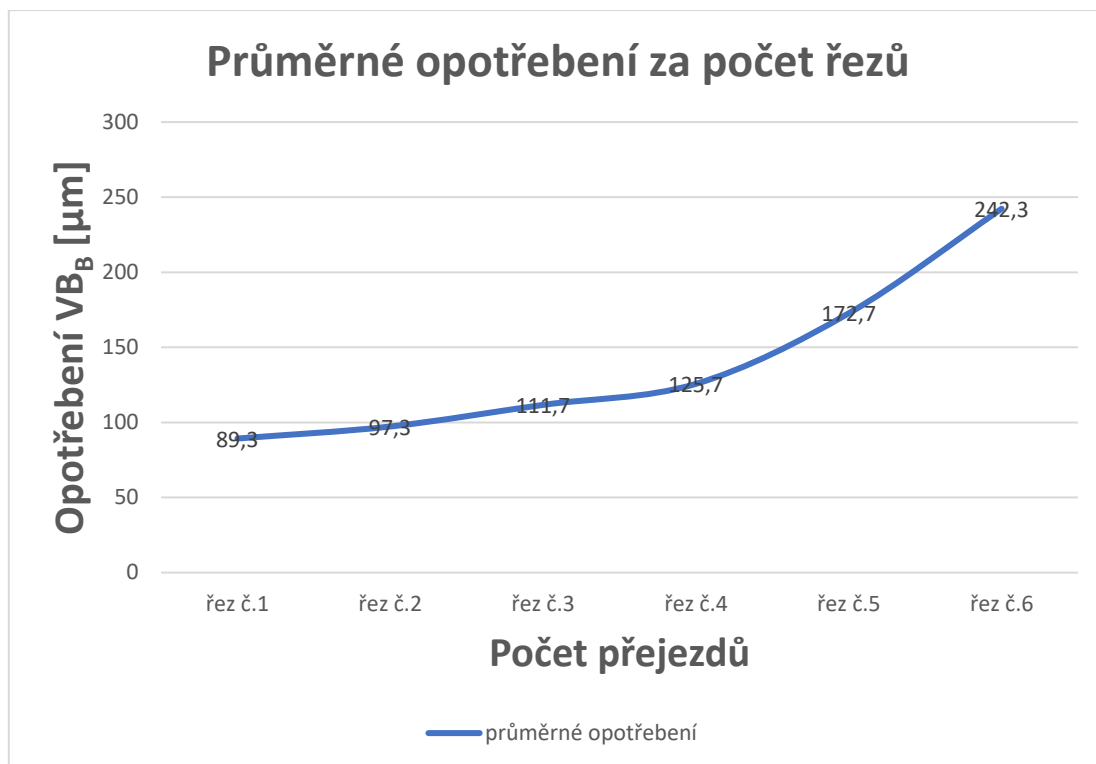


Figure 1: Průměrné opotřebení za počet řezů [vlastní zpracování]

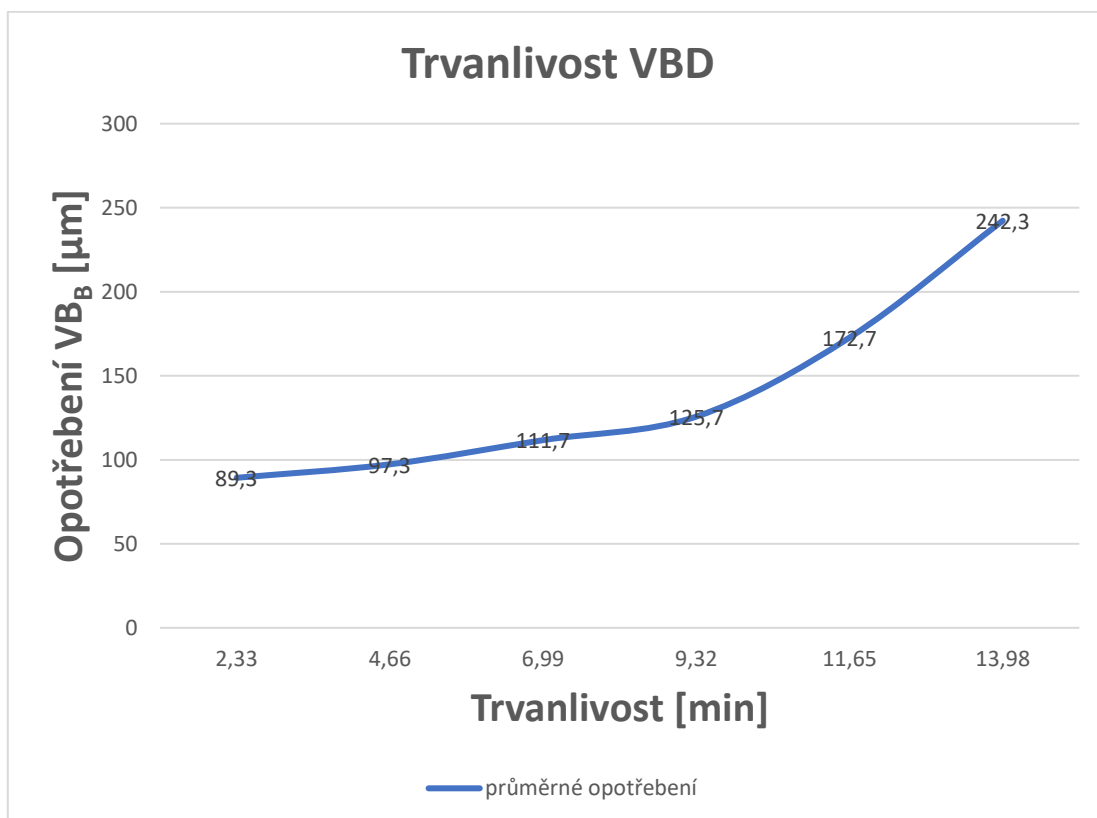


Figure 2: Trvanlivost VBD [vlastní zpracování]

Zároveň obsluha stroje prováděla přeměření skutečně odebrané vrstvy pomocí dotykové sondy, jež je součástí stroje DMU 40eVo linear. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 14 a pro názornost je vytvořen z naměřených hodnot graf první obrobenej plochy. U druhé vrstvy po obrobení

třetího pruhu je vidět změna hodnoty skutečné souřadnice Z, což koresponduje s předcházejícím obrázkem stavu bříty na pozici č.6, kde je vidět zvětšující se opotřebení. Hloubka řezu a_p byla nastavena na 1 mm.

Hodnota programované souřadnice Z							
Axiální hloubka řezu		a_p	1	[mm]			
	Řez	a_p skutečné bod 1	rozdíl [mm]	a_p skutečné bod 2	rozdíl [mm]	a_p skutečné bod 3	rozdíl [mm]
Vrstva č.1	č.1	-1,1425	0,1425	-1,1499	0,1499	-1,1411	0,1411
	č.2	-1,148	0,148	-1,1487	0,1487	-1,1402	0,1402
	č.3	-1,1452	0,1452	-1,1483	0,1483	-1,1439	0,1439
Vrstva č.2	č.4	-1,1415	0,1415	-1,144	0,144	-1,1351	0,1351
	č.5	-1,1354	0,1354	-1,1356	0,1356	-1,1304	0,1304
	č.6	-1,1266	0,1266	-1,1415	0,1415	-1,1311	0,1311
Vrstva č.3	č.7	-1,1187	0,1187	-1,1223	0,1223	-1,1087	0,1087
	č.8	x	x	x	x	x	x
	č.9	x	x	x	x	x	x

Tabulka 13: Hodnota skutečné souřadnice Z [vlastní zpracování]

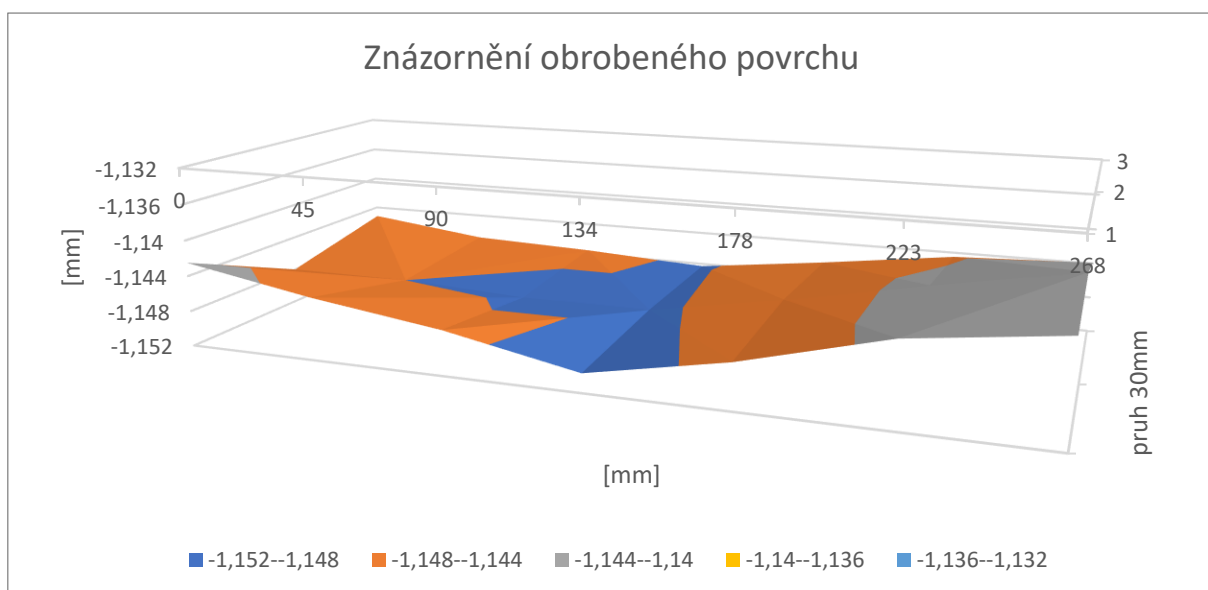


Figure 3: Znázornění obrobeneho povrchu [vlastní zpracování]

Třískota tvořená při obrábění je článkovitá a je znázorněna na následujícím obrázku číslo 3-25.



Obrázek 3-25 tříška tvořená při obrábění [vlastní zpracování]

4. Zhodnocení výsledků

Výsledné naměřené hodnoty byly porovnány s hodnotami z experimentů provedených za stejných podmínek, které se uskutečnily v průběhu posledních dvou let, provedených s frézovací hlavou OSG, Kraken, Medúza a frézovací hlavou, kterou optimalizoval kolega Bc. Mandaus Matyáš ve své diplomové práci. V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky z experimentů.

Mandaus								
	Trvanlivost T [min]	Řez	VB _B 1 [μm]	VB _B 2 [μm]	VB _B 3 [μm]	VB _B 4 [μm]	VB _B 5 [μm]	VB _B 6 [μm]
Vrstva č.1	2,33	č.1	91	89	99	101	100	96
	4,66	č.2	x	x	x	x	x	x
	6,99	č.3	129	122	126	112	117	120
Vrstva č.2	9,32	č.4	x	x	x	x	x	x
	11,65	č.5	x	x	x	x	x	x
	13,98	č.6	151	152	146	148	163	144
Vrstva č.3	16,31	č.7	x	x	x	x	x	x
	18,64	č.8	x	x	x	x	x	x
	20,97	č.9	390	355	302	232	242	372

Tabulka 14: Postupné otupování VB_B fréza Mandaus [vlastní zpracování]

Kraken bez kompozitu

	Trvanlivost T [min]	Řez	VB _B 1 [μm]	VB _B 2 [μm]	VB _B 3 [μm]	VB _B 4 [μm]	VB _B 5 [μm]	VB _B 6 [μm]
Vrstva č.1	2,33	č.1	x	x	x	x	x	x
	4,66	č.2	x	x	x	x	x	x
	6,99	č.3	120	110	120	x	x	x
Vrstva č.2	9,32	č.4	x	x	x	x	x	x
	11,65	č.5	x	x	x	x	x	x
	13,98	č.6	160	140	210	180	200	190
Vrstva č.3	16,31	č.7	x	x	x	x	x	x
	18,64	č.8	x	x	x	x	x	x
	20,97	č.9	x	x	x	x	x	x
Vrstva č.4	23,3	č.10	x	x	x	x	x	x
	25,63	č.11	x	x	x	x	x	x
	27,96	č.12	x	x	x	x	x	x

Tabulka 15: Postupné otupování VB_B fréza Kraken bez kompozitu [vlastní zpracování]

Kraken s kompozitem

	Trvanlivost T [min]	Řez	VB _B 1 [μm]	VB _B 2 [μm]	VB _B 3 [μm]	VB _B 4 [μm]	VB _B 5 [μm]	VB _B 6 [μm]
Vrstva č.1	2,33	č.1	x	x	x	x	x	x
	4,66	č.2	x	x	x	x	x	x
	6,99	č.3	110	90	100	110	x	x
Vrstva č.2	9,32	č.4	x	x	x	x	x	x
	11,65	č.5	x	x	x	x	x	x
	13,98	č.6	140	100	130	120	160	110
Vrstva č.3	16,31	č.7	x	x	x	x	x	x
	18,64	č.8	x	x	x	x	x	x
	20,97	č.9	180	120	190	170	190	170
Vrstva č.4	23,3	č.10	x	x	x	x	x	x
	25,63	č.11	x	x	x	x	x	x
	27,96	č.12	310	190	250	240	KO	270

Tabulka 16: Postupné otupování VB_B fréza Kraken s kompozitem [vlastní zpracování]

OSG

	Trvanlivost T [min]	Řez	VB _B 1 [μm]	VB _B 2 [μm]	VB _B 3 [μm]	VB _B 4 [μm]	VB _B 5 [μm]	VB _B 6 [μm]
Vrstva č.1	2,33	č.1	x	x	x	x	x	x
	4,66	č.2	x	x	x	x	x	x
	6,99	č.3	110	130	100	120	120	x
Vrstva č.2	9,32	č.4	x	x	x	x	x	x
	11,65	č.5	x	x	x	x	x	x
	13,98	č.6	150	150	120	180	140	140
Vrstva č.3	16,31	č.7	x	x	x	x	x	x
	18,64	č.8	x	x	x	x	x	x
	20,97	č.9	180	190	160	210	220	240
Vrstva č.4	23,3	č.10	x	x	x	x	x	x
	25,63	č.11	x	x	x	x	x	x
	27,96	č.12	220	220	210	KO	300	330

Tabulka 17: Postupné otupování VB_B fréza OSG [vlastní zpracování]

Pro porovnání jsou přiložené grafy, ve kterých jsou zobrazeny všechny varianty frézovacích hlav. První graf znázorňuje závislost opotřebení na počtu obrobenech vrstev a druhý je znázornění trvanlivosti VBD.

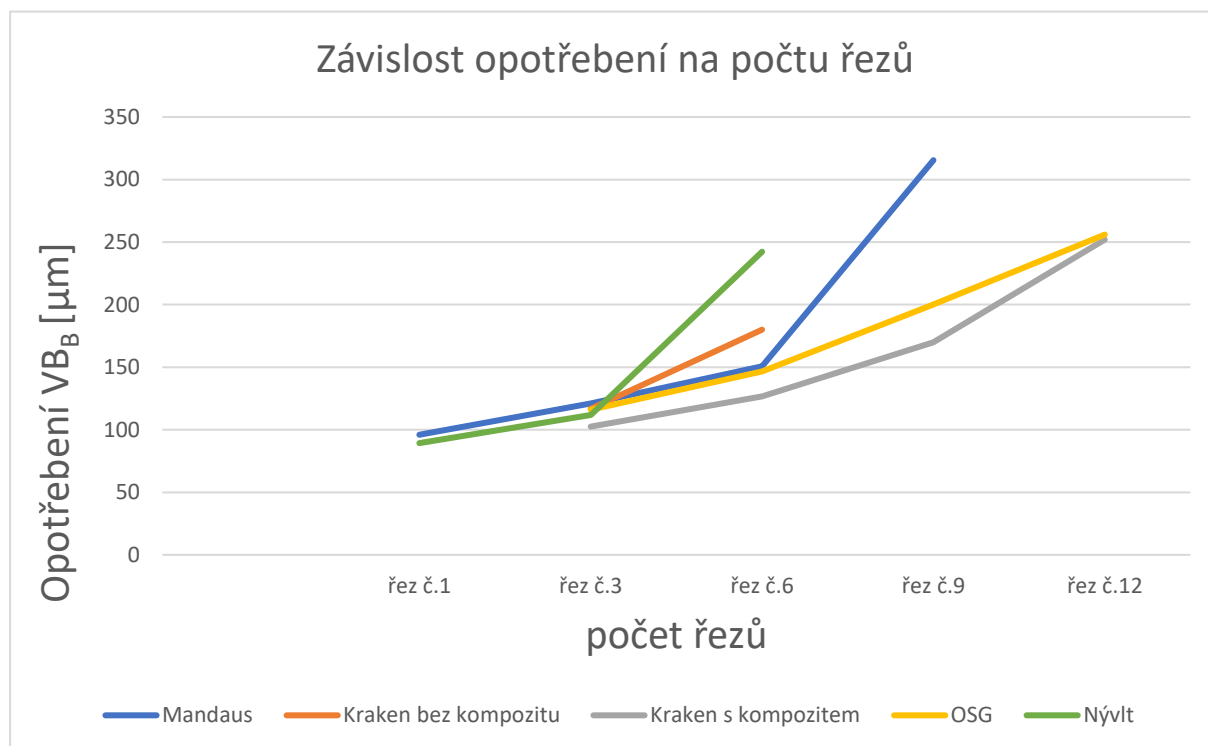


Figure 4: Závislost opotřebení na počtu řezů [vlastní zpracování]

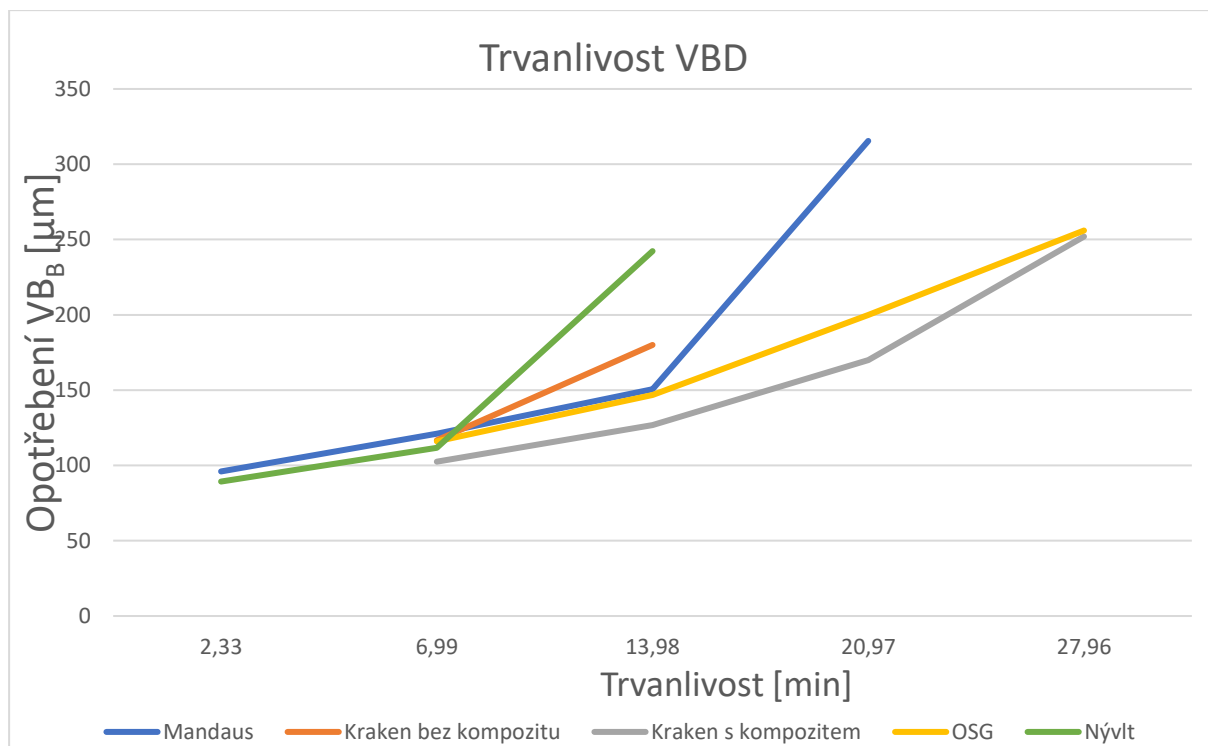


Figure 5: Trvanlivost VBD [vlastní zpracování]

4.1. Technické hodnocení

Z důvodu absence tepelného zpracování po vytištění frézy, kdy došlo ke zkroucení a následné nemožnosti obrobít část dosedací ploch VBD, konkrétně radiální i axiální opěrnou část, nemá experiment vypovídající hodnotu. Pro příští konání experimentu, bude nutné výrobní proces zopakovat a dodržet všechny technologické náležitosti 3D tisku.

Podarenou částí experimentu bylo nasměrování proudu chladicí kapaliny na předem vytipovaná místa, která jsou v průběhu obrábění nejvíce tepelně namáhána.



Obrázek 4-1: Proud chladicí kapaliny [vlastní zpracování]



Obrázek 4-2: Neobrobená dosedací plocha pro VBD [vlastní zpracování]

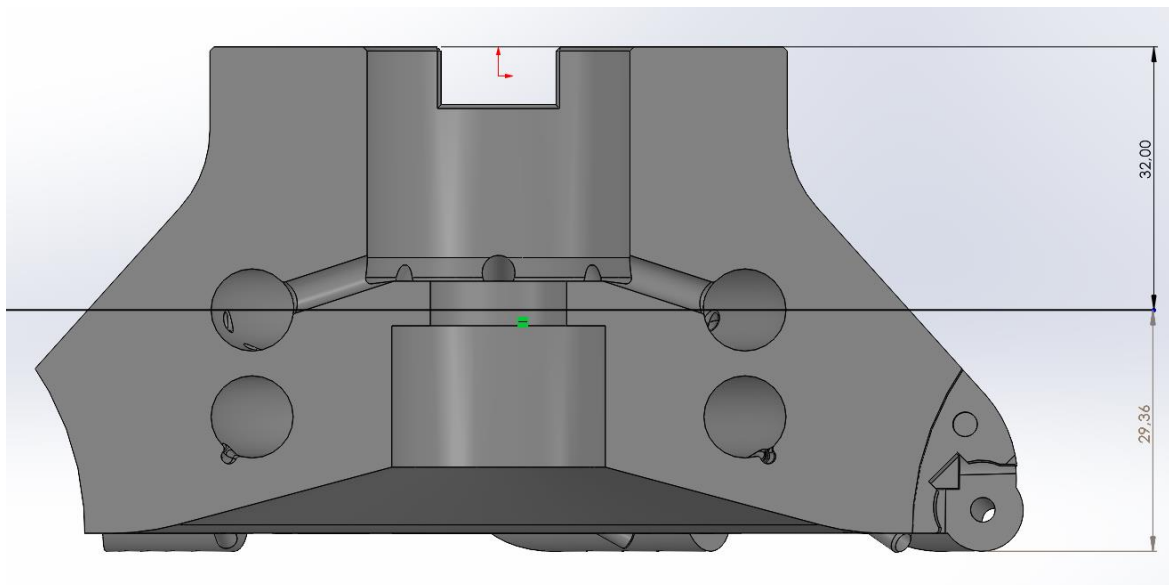
Na předchozím obrázku 4-1 je vidět neobrobená část dosedací plochy. Bylo to z důvodu deformace způsobené zbytkovým pnutím. Kde i přes dostatečné přídavky pro obrábění ložných ploch břitové destičky (1 mm), zde nebylo dostatek materiálu, aby byla tato plocha obrobena. V pozadí je vidět správně obrobená plocha, kde byl dostatek materiálu pro obrábění.

Při obrábění nevykazovala fréza žádné zvýšené vibrace z důvodu nevyváženosti a nevydávala žádné neobvyklé zvuky, jako například fréza Kraken bez kompozitu.

4.2. Možnost optimalizace s cílem snížení celkových výrobních nákladů

Při výrobě nástrojů je nezanedbatelným hlediskem čas výroby a výsledná cena. Pokud porovnáme výrobu konvenční technologií a aditivní technologií, vychází aditivní technologie zatím mnohem časově náročněji. Není však nutné celý nástroj vyrábět 3D tiskem, pokud je možné určitou část vyrobit konvenční technologií.

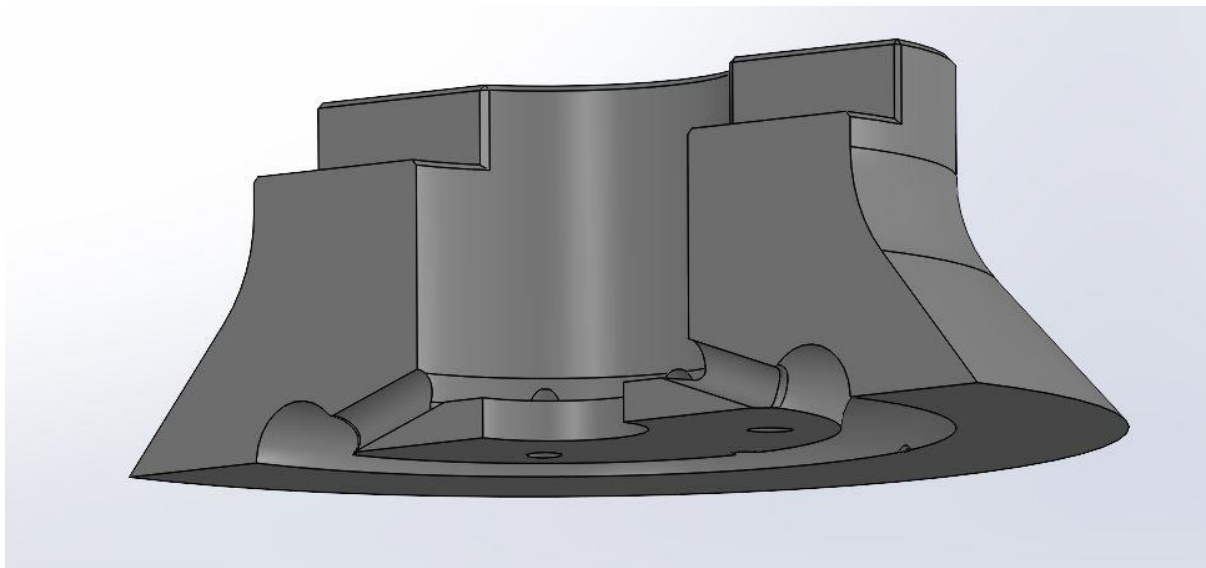
Během návrhu frézovací hlavy se naskytla možnost optimalizace, která by si kladla za cíl snížení výrobních nákladů. Byla nalezena dělicí rovina, která by umožňovala vyrobit část konvenční technologií z polotovaru na CNC obráběcím centru a zbytek by mohl být dotisknut na 3D tiskárně. Na následujícím obrázku 4-2 je tato rovina znázorněna.



Obrázek 4-3: [vlastní zpracování]

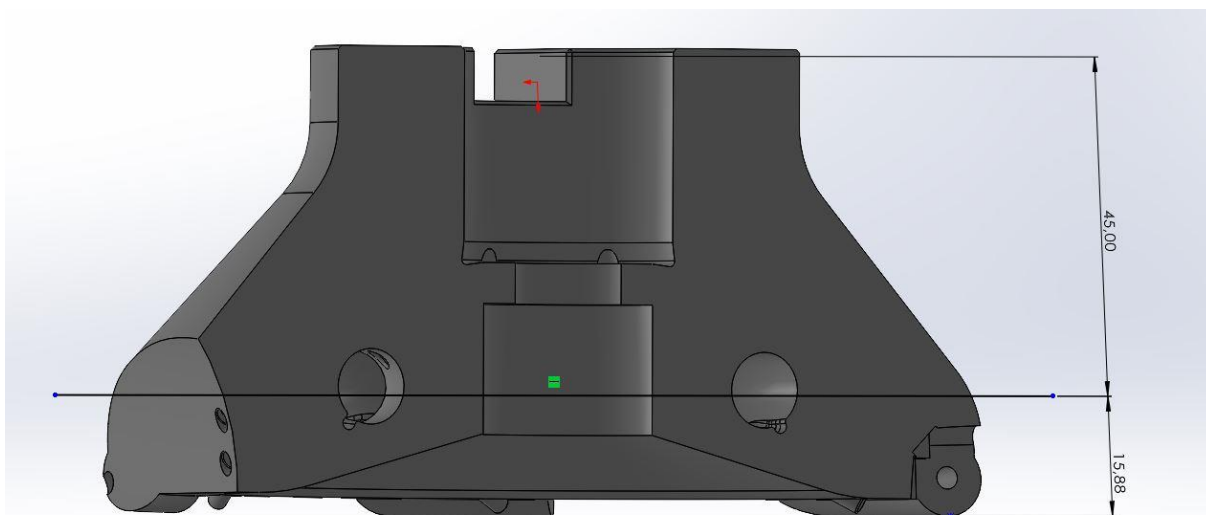
V případě rozdělení součásti je možné nejen ušetřit materiál potřebný pro tisk, ale i uspořít čas. Jak je vidět na obrázku 4-2, tímto krokem by bylo dosaženo úspory přibližně 1/3 materiálu potřebného pro tisk.

Na následujícím obrázku 4-3 je model v řezu části frézovací hlavy, který je možné vyrobit konvenční technologií.



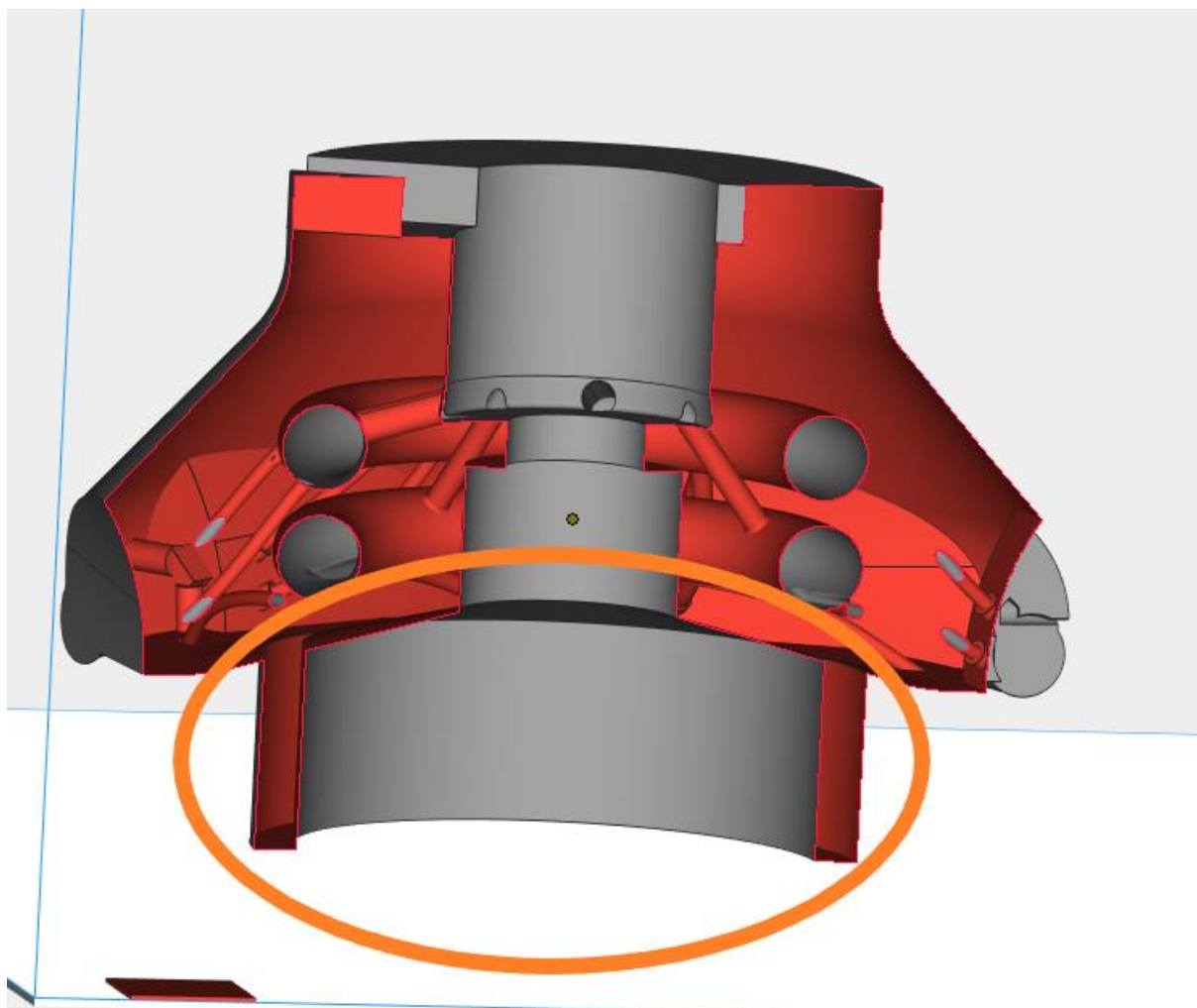
Obrázek 4-4: [vlastní zpracování]

Při částečném přepracování návrhu, kdy by se místo dvou zásobních prstenců na provozní kapalinu použil jen jeden, který by byl umístěn co nejnižší v horní části lůžek pro břitové destičky. Návrh by mohl vypadat například tak, jak je vyobrazeno na obrázku č.4-4.

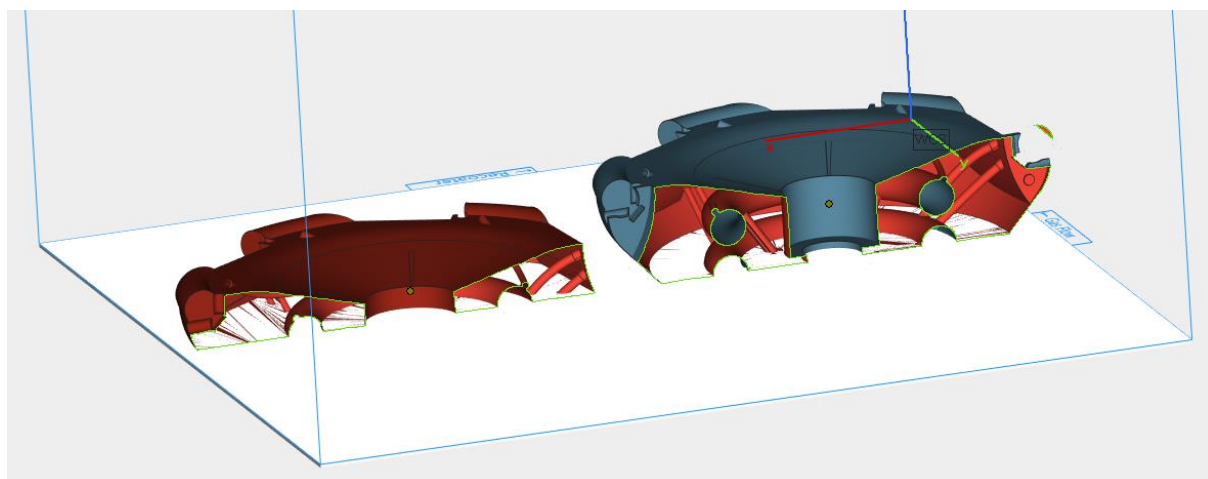


Obrázek 4-5: [vlastní zpracování]

Přínosem tohoto návrhu by bylo snížení spotřeby materiálu potřebného pro tisk a tím i zrychlení výroby této frézovací hlavy a současně získání maximálního benefitu 3D tisku v oblasti volné konstrukce tvarů a velikostí kanálků. Pro porovnání rychlosti výroby a spotřeby materiálu při 3D tisku byly v softwaru pro přípravu 3D tisku Magics (obrázek č. 4-5) zpracovány všechny tři varianty a v následující tabulce č.19 jsou uvedena všechna uvažovaná řešení výroby frézovací hlavy s vypočítanou dobou tisku a hmotností vytištěné části. Jsou to 100% 3D tisk, částečný 3D tisk se stávajícím řešením optimalizace a přepracovaný návrh uzpůsobený ke snížení výrobních nákladů. Při změně designu spodní části frézy by byla možná úspora při 3D tisku ještě tím, že by se dal odebrat materiál, který tvoří stěny vnitřního rozvodu procesní kapaliny. Tyto stěny by mohly mít tloušťku pouze v řádu mm. Na obrázku č.4-6 je vidět, že při 100% 3D tisku se musí vytisknout i prstýnek pro upnutí do čelistí, aby mohla být obrobena díra pro upnutí a



Obrázek 4-7: Model pro tisk 100 % tisku nástroje a zvýrazněný prstýnek, který je nutné vytisknout pro následné obrábění [vlastní zpracování]



Obrázek 4-8: Model pro tisk varianta přepracovaný návrh frézy a částečný 3D tisk [vlastní zpracování]

5. Závěr

V předkládané diplomové práci byly v úvodní teoretické části popsány druhy 3D tisku podle normy Norma ISO/ASTM 52900:2015. Dále byly představeny nástroje, na kterých byly provedeny různé druhy optimalizace. Jednalo se o optimalizaci hmotnosti, chlazení, tvaru a topologie. Jako příklady pro optimalizaci ve výrobě nástrojů pro frézování, byly představeny produkty vyráběné aditivní technologií předními světovými výrobci nástrojů jako jsou Gühring, Sandvik, nebo Komet Group. Jako poslední v teoretické části byly uvedeny možné směry vývoje 3D tisku frézovacích nástrojů.

Na začátku praktické části byly zdůrazněny poznatky z teorie obrábění, jako jsou tvoření třísky, teplotně nejexponovanější místa na řezném nástroji při frézování a vlivy chlazení, které mají vliv na trvanlivost obráběcího nástroje. Cílem této diplomové práce bylo optimalizovat frézovací hlavu. Tato optimalizace spočívala v přivedení procesní kapaliny na nejvíce exponovaná místa během obráběcího procesu. V první části byl navržen 3D model v software Siemens NX, následně byl tento model vytištěn na 3D tiskárně EOS M 290 a byly obrobena funkční plochy pro upnutí frézy na trn a k připevnění VBD. Následovalo přeměření radiálního a axiálního směru házení, při kterém se zjistilo, že fréza vykazuje mírnou nesymetričnost. Bylo to zaviněno chybným výrobním postupem, při kterém nebylo provedeno tepelné zpracování, které mělo následovat ihned po ukončení 3D tisku a očištění součásti. Díky tomuto se fréza vlivem zbytkových napětí zkroutila. Druhou hypotézou, která se bude dále prověřovat je chybné nastavení 3D tiskárny. Nadále však bylo pokračováno v experimentu a fréza byla upnuta do obráběcího stroje DMU 40eVo linear výrobce DMG MORI. Byl odzkoušen přívod procesní kapaliny a podle vizuálního posouzení směřovala kapalina přesně na místa, jak bylo naplánováno. Poté začal experiment obrábění desky z Inconelu 718. Výsledné naměřené hodnoty byly porovnány s hodnotami z experimentů provedených za stejných podmínek, které se uskutečnily v průběhu posledních dvou let, provedených s frézovací hlavou OSG, Kraken, Medúza a frézovací hlavou, kterou optimalizoval kolega Bc. Mandaus Matyáš ve své diplomové práci. Pomocí grafů byly znázorněny doby trvanlivosti a vizualizován výsledný povrch po obrobení. Na tomto místě je nutné připomenout, že výsledky nemají vypovídající hodnotu z důvodu nepřesnosti výroby. Pro příští konání experimentu, bude nutné výrobní proces zopakovat a dodržet všechny technologické náležitosti 3D tisku.

V závěru práce je naznačena možnost následné optimalizace s cílem snížení výrobních nákladů, která se sestává z kombinace aditivní a konvenční technologie. Je zde zároveň uvedeno porovnání spotřeby materiálu a doby výroby pro tři možnosti zhotovení této frézy.

Jako doporučení pro bezproblémovou výrobu a následnou bezchybnou funkčnost by se v příštích případech mělo uvažovat vytištění větší vrstvy materiálu v oblasti upínacích ploch břitové destičky. Celé lůžko by se následně obrobilo a předešlo by se problémům při menším zkroucení z důvodu zbytkového pnutí.

6. Seznam použitých zdrojů

Bibliografické odkazy a citace vychází z normy ČSN ISO 690 (01 0197). Podrobný návod, jak citovat literaturu a prameny, s příklady je uveden na stránkách knihovny ZČU <https://sites.google.com/site/novaiso690/>.

[1] Pagáč, M.. Začínáme s 3d tiskem kovů. Konstruktér. [Online] 23. Listopad 2016. [Citace:28. Listopad 2021.] <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3dtiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>.

[3] Steen, van der D. © 2022. *Post processing for SLA printed parts* [online] [vid. 20.4.2022] Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/post-processing-sla-printed-parts/>

[4] Molitch-Hou, M. © 2022. *What Does Post-Processing for HP MJF 3D Printing Look Like*[online] [vid. 25.4.2022] ?. <https://www.engineering.com/story/what-does-post-processing-for-hp-mjf-3d-printing-look-like>

[5] Kumar, L. J., Pandey, P. M., Wimpenny, D. 2019. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. ISBN 978-981-13-0304-3 <https://studylib.es/doc/9081921/3d-printing-and-additive-manufacturing-technologies-by-l....>

[7] MANUFACTUR3D. 2019. *7 Methods of Manufacturing Metal 3D Printing Powder*. [online] [vid. 2.5.2022] Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/7-methods-manufacturing-metal-3d-printing-powder/>

[8] Dawes, J., Bowerman, R., Trepleton, R., Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. Johnson Matthey Technol. Rev., 2015, 59, (3), 243-256

[11] Zetek, M; Zetková, I.; Bakša, T. 2019. *Nástroje nové generace*. [online] [vid. 2.5.2022] Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/nastrojarna/nastroje-nove-generace/>

[12] Rulc, V.; Hanzl, P.; Zetek, M. *Inovativní řešení frézovací hlavy*. [online] [vid. 28.4..2022] Dostupné z: <https://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/10714-inovativni-reseni-frezovaci-hlavy.html>

[13] Tanskanen, P. (2002) The evolutionary structural optimization method: theoretical aspects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Elsevier, roč. 191, č. 47-48, s. 5485-5498. ISSN 0045-7825. [online] [vid. 28.4..2022] Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0045782502004644?to-ken=7F1085BED50095AF2E9EC0346A9CA99D386E4197BECA70C8E59830313BBA7AF3FE1574C526CCB0733E6D352945843328&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211128114609>

[14] Gebisa, A. W.; Lemu, H. G. 2017. A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 276 (2017) 012026. [online] [vid. 2.5.2022] Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/276/1/012026/pdf>

[15] Nguyen, D. S., Vignat, F. 2016. A method to generate lattice structure for Additive Manufacturing. *2016 IEEE international Conference on Industrial Engineering and Engineering Managemen*. Bali, 4. – 7. 12 2016: sborník příspěvků. Brno: Tribun EU, 2008, s. 121-136. ISSN 2157-362X. [online] [vid. 28.4.2022] Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7798021>

[16] Advanced Engineering s.r.o. © 2022. *Strukturální optimalizace*. [online] [vid. 28.4.2022] Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/informacne-technologie/9231-strukturalni-optimalizace>

- [18] SANDVIK CZ s.r.o. © 2022. *Výkonnost: Odlehčená fréza CoroMill® 390 vyráběná s využitím aditivní výroby.* [online] [vid. 28.4.2022] Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_390/pages/success-stories.aspx
- [19] Frick, W. 2019. *Neue Werkstoffe erfordern den Einsatz von PKD-Fräsern* [online] [vid. 3.5.2022] Dostupné z: <https://www.werkzeug-formenbau.de/trends-innovationen/technologie/neue-werkstoffe-erfordern-den-einsatz-von-pkd-fraesern-313.html>
- [20] GÜHRING. 2018. *PKD-/PCBN-Werkzeuge.* [online] [vid. 3.5.2022] Dostupné z: <https://guehring.com/at/produkte/pkd-pcbn-werkzeuge/>
- [21] GÜHRING. 2018. *AUTOMOTIVE.* [online] [vid. 3.5.2022] Dostupné z: https://guehring.com/wp-content/uploads/2018/dokumente/EN/catalogues-special-programmes/PKD_Automotive_2018_EN.pdf
- [23] Komet Group GmbH. 2017. *Aus Ideen wachsen Werkzeuge.* [online] [vid. 3.4.2022] Dostupné z: <https://mav.industrie.de/fertigung/werkzeuge/aus-ideen-wachsen-werkzeuge/#slider-intro-1>
- [24] Zelinski, P. 2020. *3D Printed Tool for CNC Machining: The Cool Parts Show* [online] [vid. 8. 3. 2022] Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/3d-printed-tool-for-cnc-machining-the-cool-parts-show-s3e1>
- [25] Hedrixson, S.; Zelinski, P.; Donaldson, B. 2021. *10 Exapmls of 3D-Printed Tooling.* [online] [vid. 18.2.2022] Dostupné z: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/big-ideas-in-am-10-examples-of-3d-printed-tooling>
- [26] SolidVidion, s.r.o. 2018. *Materiálový list – Nástrojová ocel H13.* [online] [vid. 7.1.2022] Dostupné z: <https://www.3d-tiskarna.cz/wp-content/uploads/2021/03/h13-tool-steel.pdf>
- [27] Rafiee, M.; Farahani, R. D.; Therriault, D. *Multi-Material 3D and 4D Printing: A Survey. Advanced Science.* Weinheim: 2020, 7. ISSN 2198-3844. [online] [vid. 18.2.2022] Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/advs.201902307>
- [28] Dessault Systèmes. 2018. *Material Extrusion – FDM* [online] [vid. 20.2.2022] Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-extrusion>
- [29] MANUFACTUR3D. 2018. *The 7 Types of Additive Manufacturing Technologies.* [online] [vid. 12.1.2022] Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/7-types-additive-manufacturing-technologies/>
- [30] cotu s.r.o. 2020. *MJF (Multi Jet Fusion)* [online] [vid. 8.2.2022] Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
- [31] Morgen Filament. 2018 *FDM 3D Printing: Effects on Typical Parameters on Functional Parts.* [online] [vid. 3.2.2022] Dostupné z: <https://www.morgen-filament.de/fdm-3d-printing-effects-of-typical-parameters-on-functional-parts/>
- [32] Prusa Research a.s. nedatováno. *3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+.* [online] [vid. 11.1.2022] Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s-3/>
- [33] Alexandria, P. 2019. *The Complete Guide to Material Jetting (PolyJet) in 3D Printing.* [online] [vid. 8.2.2022] Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/polyjet100420174/>

- [34] Freeman Technology. 2021. Characterising silk powders for binder jetting: working towards an innovative solution for bio-scaffold printing. [online] [vid. 3.2.2022] Dostupné z: <https://www.news-medical.net/life-sciences/Characterising-silk-powders-for-binder-jetting-working-towards-an-innovative-solution-for-bio-scaffold-printing.aspx>
- [35] WZR ceramic solution GmbH. © 2022. *Complete process development up to the 3D component made of technical ceramics*. [online] [vid. 3.2.2022] Dostupné z: <https://wzr.cc/en/binder-jetting-2/>
- [36] Dr. Jin's Research Group Soft Material 3D Printing Lab. © 2022. *What Sheet Lamination is*. [online] [vid. 5.1.2022] Dostupné z: <https://yifeijin.org/sheet-lamination/>
- [37] Engineeringproductdesign. © 2017-2022 *Sheet Lamination. What is sheet Lamination*. [online] [vid. 7.1.2022] Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>
- [38] Özel, T.; Altay, A.; Senin, N. 2019. Focus Variation Measurement and Prediction of Surface Texture Parameters Using Machine Learning in Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 142 (1). ISSN 1087-1357. [online] [vid. 15.1.2022] Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/A-typical-laser-powder-bed-fusion-for-layers-built-on-the-XY-surface-with-Z-build_fig1_337445319
- [39] CRS Holdings, LLC. © 2022. *Energy. Manufactured Parts*. [online] [vid. 15.1.2022] Dostupné z: <https://www.carpentertechnology.com/energy/manufactured-parts>
- [40] Engineeringproductdesign. © 2017-2022. *Directed Energy Deposition*. [online] [vid. 12.1.2022] Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/directed-energy-deposition/>
- [41] Alliance Communication, Inc. 2017. *Hybrid Machine Tools*. [online] [vid. 15.2.2022] Dostupné z: <https://www.fabricatingandmetalworking.com/2017/02/hybrid-machine-tools/>
- [42] Sandvik AB. 2019. *Sandvik creates first 3D printed diamond composite*. [online] [vid. 15.2.2022] Dostupné z: <https://www.additive.sandvik/en/news-trends/archive/2019/05/sandvik-creates-first-3d-printed-diamond-composite/>
- [43] ZČU. 2018. *Frézovací hlava Krakem z RTI získala zlatou medaili na MSV Brno*. [online] [vid. 18.2.2022] Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodaj-stvi/frezovaci-hlava-kraken-z-rti-ziskala-zlatou-medaili-na-msv-brno_45218.html
- [44] Stará, Š. 2021. *ZČU představuje na Mezinárodním strojírenském veletrhu inovativní řešení pro průmyslovou praxi*. [online] [vid. 15.3.2022] Dostupné z: <https://info.zcu.cz/clanek.jsp?id=3896&lang=cs>
- [45] Mapal Dr Kress KG. 2018. *Serienreife Produkte*. [online] [vid. 5.2.2022] Dostupné z: <https://mav.industrie.de/peripherie/anlagen-verfahren/serienreife-produkte/#slider-intro-5>
- [46] Graham, D. 2014. *Rozpoznání a vyřešení osmi nejčastějších opotřebení břitových destiček*. [online] [vid. 15.1.2022] Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/technicke-no-vinky/rozpoznani-a-vyreseni-osmi-nejcastejsich-typu-opotrebeni-britovych-desticek>
- [47] CERAZIT Group. © 2022. *Příčiny a typy opotřebení při loupání tyčí* [online] [vid. 15.1.2022] Dostupné z: https://cuttingtools.cerazit.com/cz/cs/odv_tvi/loup_aacute_n_iacute_tyiacute/co-je-dobr_eacute-vdt-a-tipy/opot_eben_iacute.html

- [49] Jersák, J. 2013. *Teplo a teploty při obrábění řezných nástrojů*. [online] [vid. 15.1.2022] Dostupné z: http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/VY_03_36-Teplo%20a%20teploty%20p%C5%99i%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD,%20opot%C5%99eben%C3%AD%20%C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF_MZ_6%20%20.pdf
- [50] podklady přednášek předmětu STO
- [51] SANDVIK CZ s.r.o. © 2022. *Použití řezné kapaliny a chlazení při soustružení*. [online] [vid. 8.2.2022] Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning.aspx>
- [52] SANDVIK CZ s.r.o. 2018. *Přesný přívod řezné kapaliny pomáhá při soustružnických závitorezných operacích*. [online] [vid. 8.2.2022] Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/news/press_releases/pages/precision-coolant-helps-fasten-thread-turning-operations.aspx
- [53] SANDVIK CZ s.r.o. 2013. *Nové pokrokové technologické řešení trysek umožňuje optimalizaci účinku řezné kapaliny*. [online] [vid. 12.2.2022] Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/news/press_releases/pages/high-pressure.aspx
- [54] Busch, K.; Hochmuth, C.; Pause, B.; Stoll, A.; Wertheim, r. 2016. Investigation of Cooling and Lubrication Strategies for Machining High-temperature Alloys. *Procedia CIRP*. 2016 (41). pp. 835-840. ISSN 2212-8271. [online] [vid. 8.2.2022] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115010574>
- [56] FOREJT, M.; PÍŠKA, M. 2006. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [57] Zheng, S. 2020. *What are SLA, DLP, and LCD resin 3d printers? What are their molding principles and differences?* [online] [vid. 12.1.2022] Dostupné z: <https://www.creality3dofficial.com/blogs/news/what-are-sla-dlp-and-lcd-resin-3d-printers-what-are-their-molding-principles-and-differences>
- [58] EOS. © 2022. *EOS M 290 Award Winner Metal 3D Printer*. [online] [vid. 8.4.2022] Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-290>
- [59] OSG. © 2022. *PHOENIX® PRC. Indexable Radius Cutter*. [online] [vid. 8.2.2022] Dostupné z: <https://catalog.osgtool.com/list/78PRC?edp=7816051>
- [60] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Rotační pouzdro obsahující odlehčenou strukturu. Původci: Pavel HANZL, Miroslav ZETEK, Ivana ZETKOVÁ, Hynek PURŠ a Vojtěch RULC. Česká republika. Užité vzor CZ 34 145 U1. 15.4.2020

Seznam obrázků

Obrázek 2-1: Rozdělení 3D tisku podle normy ISO/ASTM 52900:2015 [27]	7
Obrázek 2-2: Schema Material Extrusion [31]	8
Obrázek 2-3: Tiskárna FFD [32]	8
Obrázek 2-4: Schema Materiál Jetting [28]	9
Obrázek 2-5: Výrobek vytvořený metodou Materiál Jetting [33]	9
Obrázek 2-6: Schéma Binder Jetting [34]	10
Obrázek 2-7: Výrobky vytvořené metodou Binder Jetting [35]	10
Obrázek 2-8: Schéma Sheet Lamination [37]	11
Obrázek 2-9: Výrobek vytvořený metodou sheet lamination[36]	11
Obrázek 2-10: Druhy vytvrzování fotopolymerních pryskyřic [57]	12
Obrázek 2-11: Propagační předmět vytvořený metodou Powder Bed Fusion [39]	13
Obrázek 2-12: Schéma metody Powder Bed Fusion[38]	13
Obrázek 2-13: Znázornění technologického postupu při metodě SLS [26]	13
Obrázek 2-14: Metoda Directed Energy Deposition [40]	14
Obrázek 2-15: Hybrid Manufacturing [41]	14
Obrázek 2-16: Fréza Kraken [43]	15
Obrázek 2-17: Vnitřní struktura frézy Medúza [60]	17
Obrázek 2-18: Vnitřní struktura frézy Medúza [60]	17
Obrázek 2-19: Fréza Medúza [44]	18
Obrázek 2-20: Optimalizace velikosti, tvaru a topologie [14]	20
Obrázek 2-21: Proces optimalizace topologie [14]	21
Obrázek 2-22: Příklady jednotkových tvarů buněčné struktury [15]	22
Obrázek 2-23: Vrstva jednotkových buněčných struktur [15]	22
Obrázek 2-24: Fréza CoroMill® 390 [18]	23
Obrázek 2-25: PKD fréza s aditivně vyráběným krytem (Smart Cap) [19]	25
Obrázek 2-26: Smart Cap [21]	25
Obrázek 2-27: Produktová řada nástrojů Revolution [23]	26
Obrázek 2-28: Šroubovací hlavy [23]	27
Obrázek 2-29: Stopková fréza od firmy Gühring vytištěná z materiálu H13 [25]	27
Obrázek 2-30: Struktura materiálu H13 [26]	28
Obrázek 3-1: Šíření tepla v nástroji, obrobku a tříse [49]	30
Obrázek 3-2: Znázornění rozdělení tepla při změně rychlosti [50]	30
Obrázek 3-3: Zkratky [49]	30
Obrázek 3-4: Závislost opotřebení na teplotě a na řezných podmínkách [50]	31

Obrázek 3-5: Teplotní pole obrobek, nástroj, tříska [49]	31
Obrázek 3-6: Oblasti plastických deformací [50]	32
Obrázek 3-7: Opatření řezných nástrojů způsobené zvýšenými teplotami [46,47]	33
Obrázek 3-8: Varianty přívodu procesní kapaliny příklad u soustružení [56]	34
Obrázek 3-9: Přívod procesní kapaliny – zaplavení, přesný přívod [51]	34
Obrázek 3-10: Druhy přívodu procesní kapaliny [54]	36
Obrázek 3-11: Hydraulický klín a jeho přínos [51]	36
Obrázek 3-12: Znázornění dělení třísky a kratší styková plocha při vysokotlakém chlazení [54]	37
Obrázek 3-13: Vyústění kanálků [vlastní zpracování]	38
Obrázek 3-14: Náhled do vnitřního uspořádání kanálků pro přívod procesní kapaliny [vlastní zpracování]	39
Obrázek 3-15: Proudnice [vlastní zpracování]	39
Obrázek 3-16: Tryska pro chlazení hřbetu VBD [vlastní zpracování]	40
Obrázek 3-17: Plochy s přídavkem pro obrábění [vlastní zpracování]	40
Obrázek 3-18: Model obrobené frézy [vlastní zpracování]	41
Obrázek 3-19: 3D tiskárna EOS M290 [vlastní zpracování]	41
Obrázek 3-20: Fréza po 3D tisku [vlastní zpracování]	43
Obrázek 3-21: Fréza po obrobení funkčních ploch [vlastní zpracování]	44
Obrázek 3-22: Fréza připravená k obrábění [vlastní zpracování]	46
Obrázek 3-23: Zkouška průchodnosti kanálků pro procesní kapalinu [vlastní zpracování]	47
Obrázek 3-24: Postupné opotřebovávání hřbetu VBD [vlastní zpracování]	49
Obrázek 3-25 tříska tvořená při obrábění [vlastní zpracování]	52
Obrázek 4-1: Proud chladicí kapaliny [vlastní zpracování]	55
Obrázek 4-2: Neobrobená dosedací plocha pro VBD [vlastní zpracování]	56
Obrázek 4-3: [vlastní zpracování]	57
Obrázek 4-4: [vlastní zpracování]	58
Obrázek 4-5: [vlastní zpracování]	58
Obrázek 4-6: Návrh varianty č.3 v software pro přípravu 3D tisku Magics [vlastní zpracování]	59
Obrázek 4-7: Model pro tisk 100 % tisku nástroje a zvýrazněný prstýnek, který je nutné vytisknout pro následné obrábění [vlastní zpracování]	60
Obrázek 4-8: Model pro tisk varianta přepracovaný návrh frézy a částečný 3D tisk [vlastní zpracování]	60

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání konvenčně a aditivně vyráběné frézy CoroMill® 390 [18].....	24
Tabulka 2: Porovnání při použití stávajícího řešení a frézy CoroMill® 390 ve výrobní společnosti [18]	24
Tabulka 3: Porovnání při použití stávajícího řešení a frézy CoroMill® 390 ve výrobní společnosti [18]	24
Tabulka 4: Složení nástrojového materiálu pro tisku metodou FFF na stroji Markforged Metal X [26]	28
Tabulka 5: Přínosy přívodu procesní kapaliny na čelo a hřbet nástroje [51]	35
Tabulka 6: Technická data 3D tiskárny EOS M290 [58].....	42
Tabulka 7: Typy destiček pro obrábění [59]	44
Tabulka 8: Rozměry zvolené VBD [59]	45
Tabulka 9: Hodnoty měření frézy software Zoller [vlastní zpracování]	45
Tabulka 10: Řezné parametry [vlastní zpracování].....	48
Tabulka 11: Dílenský mikroskop Multicheck 500 PC [57]	48
Tabulka 12: Postupné otupování VB _B [vlastní zpracování]	49
Tabulka 13: Hodnota skutečné souřadnice Z [vlastní zpracování]	51
Tabulka 14: Postupné otupování VB _B fréza Mandaus [vlastní zpracování]	52
Tabulka 15: Postupné otupování VB _B fréza Kraken bez kompozitu [vlastní zpracování]	53
Tabulka 16: Postupné otupování VB _B fréza Kraken s kompozitem [vlastní zpracování]	53
Tabulka 17: Postupné otupování VB _B fréza OSG [vlastní zpracování].....	54
Tabulka 18: Porovnání doby výroby a spotřeby materiálu [vlastní zpracování]	59

Seznam grafů

Figure 1: Průměrné opotřebení za počet řezů [vlastní zpracování].....	50
Figure 2: Trvanlivost VBD [vlastní zpracování].....	50
Figure 3: Znázornění obrobeného povrchu [vlastní zpracování]	51
Figure 4: Závislost opotřebení na počtu řezů [vlastní zpracování]	54
Figure 5: Trvanlivost VBD [vlastní zpracování].....	55